

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA PAULA DA SILVA SERVIDONI

ANÁLISE DE POROSIDADE E O POTENCIAL COMO ROCHA RESERVATÓRIO
EM ESTROMATÓLITO DO RECENTE DA LAGOA SALGADA, LITORAL
FLUMINENSE – RJ

CURITIBA

2012

ANA PAULA DA SILVA SERVIDONI

ANÁLISE DE POROSIDADE E O POTENCIAL COMO ROCHA RESERVATÓRIO
EM ESTROMATÓLITO DO RECENTE DA LAGOA SALGADA, LITORAL
FLUMINENSE – RJ

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Geologia
Exploratória, no curso de Programa de Pós
Graduação em Geologia, Setor de Ciências da
Terra, Universidade Federal do Paraná.

Curitiba

2012

TERMO DE APROVAÇÃO

ANA PAULA DA SILVA SERVIDONI

**“ANÁLISE DE POROSIDADE E O POTENCIAL COMO
ROCHA RESERVATÓRIO EM ESTROMATÓLITO DO
RECENTE DA LAGOA SALGADA, LITORAL
FLUMINENSE - RJ”.**

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação
em Geologia, área de concentração em Geologia Exploratória,
da Universidade Federal do Paraná, Comissão formada por:



Prof. Dr. Celso Peres Fernandes - UFSC



Dr. Nilo Siguehiko Matsuda - PETROBRAS



Prof. Dr. José Manoel dos Reis Neto - UFPR
Presidente

Curitiba, 09 de agosto de 2012.

Dedico esse trabalho primeiro a Deus que me deu força e paciência para enfrentar todas as dificuldades presentes, a minha família que sempre esteve ao meu lado em todas as minhas decisões, e a todos os meus amigos que sempre me apoiaram nos momentos de alegria e tristezas.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminho nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

À minha família, a qual amo muito, que sempre estiveram do meu lado mostrando todo o carinho, paciência, incentivo. Tudo que conquistei devo a vocês, pois sem o amor verdadeiro e apoio que sempre me dão, eu nada seria. Em especial a minha mãe e meu irmão que me ajudam diariamente mesmo estando longe, e a minha avó que me acolheu aqui em Curitiba e me enche de carinho.

Ao meu pai que foi levado desse mundo (14/03/2012) e que me deixou um grande vazio, mas que tenho certeza, que sempre vai me apoiar e se orgulhar de toda a minha luta.

Aos meus amigos que estiveram ao meu lado me ouvindo e dando força em todos os momentos, alegres e tristes, me fortaleceram com carinho, compreensão e amizade sincera. Aos amigos de apartamento que dividiram a casa, os problemas, as alegrias, as tristezas, as calmarias, os estresses, e que foram minha família ao longo desses dois anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Manoel dos Reis Neto, por oferecer uma estrutura digna para desenvolver pesquisa, pelo acompanhamento e orientação.

Ao curso de Pós-Graduação em Geologia, do Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná, na pessoa do seu coordenador Prof. Dr. Luiz Alberto Fernandes, pelo apoio recebido.

Ao secretario da pós-graduação, Daniel Keller Mittelbach, por toda a ajuda, eficiência, apoio e auxilio nas questões burocráticas e pela amizade.

Ao Colegiado do Curso de Pós-Graduação em geologia, pela compreensão aos momentos difíceis.

A todos os funcionários do Lamir (Rodrigo, Aurea, Hulyan, Francielle, Evelin, Sueli, Mikael e Carlo) por me receberem tão bem, me ajudarem e participarem deste trabalho. Em especial Clarice Marchese que me ensinou tudo relacionado aos programas da skyscan, e ao Leandro Keije que foi extremamente prestativo e pronto a ajudar sempre.

As meninas do mestrado Talita, Márgia, Laís, Silmara e Alessandra, por me ajudarem e apoiarem em todas as dificuldades.

Ao Almério, por ser uma pessoa extremamente paciente e prestativa, sempre disposta a passar seu conhecimento e por todos os conselhos que tiveram grandes valia tanto na minha vida profissional quanto no meu crescimento como pessoa.

Ao Nilo Matzuda pela imensa paciência e disponibilidade de ajudar, por todas as sugestões e conselhos, pela correção da qualificação que foi um divisor de águas para a confecção da minha dissertação.

Ao Professor Dr. Carlos Roberto Appoloni pela forma didática de ensinar (um dos melhores professores que tive em minha vida), pela correção da qualificação que me direcionou e muito acrescentou para a confecção da minha dissertação.

Ao Professor Dr. Celso Peres Fernandes que me apoio e sempre esteve pronto a tirar minhas duvidas em todos os momentos que precisei.

A Ângela Pacheco e Barbara Trzaskos por estarem sempre prontas a me ajudar e tirar minhas duvidas todas as vezes que precisei.

A Iara Mantovani e Anderson Camargo Moreira por tudo que me ensinaram e por sempre estarem dispostos a tirar minhas duvida.

Ao Adali Ricardo Spadini por toda contribuição e sugestões que ajudaram no desenvolvimento desse trabalho.

Ao André Luiz Bueno Monteiro e Claudio Henrique da Silva (Técnico Exploração de Petróleo Pleno – PETROBRAS) pela colaboração na confecção das laminas e organização e boa vontade pra passar as informações.

A minha professora de inglês, Débora Carvalho, que sempre foi muito compreensiva, flexível e esteve sempre disposta a me ajudar. Agradeço pela tradução do resumo.

Ao Guilherme Arruda Soweck por ter me ajuda nas disciplinas e por colaborar na confecção do mapa.

Aos Professores, colegas e amigos de pós-graduação pelo convívio e aprendizado.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução dessa Tese de Mestrado.

“Há escolas que são gaiolas e há escolas que são asas. Escolas que são gaiolas existem para que os pássaros desaprendam a arte do vôo. Pássaros engaiolados são pássaros sob controle. Engaiolados, o seu dono pode levá-los para onde quiser. Pássaros engaiolados sempre têm um dono. Deixaram de ser pássaros. Porque a essência dos pássaros é o vôo. Escolas que são asas não amam pássaros engaiolados. O que elas amam são pássaros em vôo. Existem para dar aos pássaros coragem para voar. Ensinar o vôo, isso elas não podem fazer, porque o vôo já nasce dentro dos pássaros. O vôo não pode ser ensinado. Só pode ser encorajado.”

Rubens Alves

RESUMO

O objeto de estudo desse trabalho são os estromatólitos recentes encontrados na Lagoa Salgada, que foram analisados com o intuito de obter a quantificação, tipologia, morfologia e morfometria dos poros em cada camada identificada no estromatólito. A Lagoa Salgada encontra-se na parte terrestre da Bacia de Campos, integrante do complexo deltaico do rio Paraíba do Sul, está localizada no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro, região dos Lagos, Município de Campos dos Goytacazes. As rochas estromatolíticas encontradas na Lagoa Salgada são bioconstruções formadas por cianobacterias, em ambiente lacustre de águas rasas e hipersalinas. Em face das descobertas recentes, envolvendo reservatórios microbiais na seção pré-sal, fazem-se necessários estudos dirigidos para a compreensão do sistema poroso de rochas estromatolíticas. Para isto foi utilizada a técnica de microtomografia computadorizada de raios X que permite a aquisição imagens de alta resolução. Para melhor caracterização os resultados da microtomografia computadorizada de raios X foram comparados com a da petrografia e tomografia médica. A análise das imagens tomográficas e o corte vertical do estromatólito permitiram a separação da estrutura interna em três camadas e duas destas subdivididas em subcamadas, com características porosas distintas. Essas camadas foram detectadas com base no tamanho, forma e frequência de poros. Verificou-se a porosidade associada nas diferentes camadas encontradas no estromatólito e quantificou a porosidade em cada camada pelas diferentes técnicas. Conclui-se que o estromatólito apresenta uma grande heterogeneidade na tipologia, morfologia e morfometria dos poros, além de ser extremamente poroso e ter um grande potencial como rocha reservatório.

Palavras-chave: Estromatólito. Microtomografia Computadorizada de Raios X.

ABSTRACT

The subjects of this work are the recent stromatolites present at the Lagoa Salgada, onshore Campos basin, in the deltaic area of the Paraíba do Sul River. The stromatolites were analyzed aiming to quantify the morphology, types, and morphometry of their pore system. The stromatolites found at the Lagoa Salgada are bioconstructions made mostly by cyanobacterias in a hypersaline lacustrine shallow water environment. Studying the porous system of these stromatolites is important because of their similarities to the large Pre-Salt oil-rich microbial reservoirs in Santos Basin. Most of the present work was focused on X-Ray computer microtomography for its high-resolution images. The results of this technique were compared to optical petrography and medical tomography. Based on the tomographic images and in internal structures, the studied stromatolite head was divided into three different layers, each one with distinct pore characteristics. Two of these layers have been subdivided into sublayers, also based on their porous system. The main aspects used for such divisions into layers were the pore size, pore shape, and pore frequency. The associated porosity was compared to different layers of the stromatolite and the porosity found there was verified using the different techniques. One major conclusion is that the analyzed stromatolite shows great heterogeneity in typology, morphology and morphometry of pores, but most of all it is extremely porous with great potential as reservoir rocks.

Key words: Stromatolite, X-ray computer microtomography,

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVO	20
1.2 ÁREA DE TRABALHO	21
2 MÉTODOS E TÉCNICAS	23
2.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA	23
2.2 DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	24
2.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X	26
2.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	28
2.6 TOMOGRAFIAS COMPUTADORIZADA DE RAIOS X.....	30
2.6.1 Histórico da Evolução da Tomografia Computadorizada de Raios X (CT).....	35
2.6.2 Raios X – Contexto Teórico	40
3 GEOLOGIA DA REGIÃO	49
3.1 GEOLOGIA	49
3.1.1 Domínio Juiz de Fora	50
3.1.2 Domínio Serra do Mar	51
3.1.3 Domínio Região dos Lagos.....	51
3.2 COBERTURAS CENOZÓICAS.....	52
3.2.1 Depósitos Pleistocênicos – Depósitos Praias Marinhos e/ou Lagunares.....	54
3.2.2 Depósitos Holocênicos	55

3.3 EVOLUÇÃO DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO PARAÍBA DO SUL.....	55
4 ESTROMATÓLITO E POROSIDADE	57
4.1 ESTROMATÓLITOS	58
4.2. POROSIDADE	64
4.2.1. Porosidade absoluta ou total ($\varnothing t$)	64
4.2.2. Porosidade efetiva ($\varnothing e$)	65
4.2.3. Classificação de Porosidade.....	66
5 ESTROMATÓLITO DA LAGOA SALGADA.....	71
5.1 CAMADA INFERIOR (C3)	79
5.2 CAMADA INTERMEDIARIA (C2)	95
5.3 CAMADA SUPERIOR (C1)	109
6 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	128
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	132
7.1 CONCLUSÃO.....	132
7.2 RECOMENDAÇÕES.....	134
REFERÊNCIAS	135

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MAPA DA REGIÃO NORTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, DESTACANDO A LAGOA SALGADA.....	22
FIGURA 2 – ROCHA ESTROMATOLÍTICA CORTADA NA VERTICAL.	24
FIGURA 3 - MICROSCÓPIO OLYMPUS BX60 (LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE MINERAIS E ROCHAS – LAMIR/UFPR).....	25
FIGURA 4 - EXEMPLO DE UM DIFRATOGRAMA E OS MINERAIS CORRESPONDENTES COM SEUS PICOS.	27
FIGURA 5 - PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE MINERALÓGICA.	27
FIGURA 6 - CABEÇA ESTROMATOLÍTICA SENDO ANALISADA NO TOMOGRAFO BRIGHT SPEED.	30
FIGURA 7 - LABORATÓRIO DE MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X NO LAMIR/UFPR. OBSERVAR POSICIONAMENTO DA FONTE DE RAIOS X, DO DETECTOR, E DO COMPARTIMENTO ONDE AS AMOSTRAS SÃO INSERIDAS.	31
FIGURA 8 - IMAGEM DO PROGRAMA CTAN, COM A SEÇÃO TOMOGRÁFICA E A SEÇÃO BINARIZADA.	34
FIGURA 9 - IMAGEM DO PROGRAMA CVOL COM IMAGEM CONSTRUÍDA EM 3D.	35
FIGURA 10 - ILUSTRAÇÃO DA GEOMETRIA DA 1º GERAÇÃO DO CT.	36
FIGURA 11 - ILUSTRAÇÃO DA GEOMETRIA DA 2º GERAÇÃO DO CT.	37
FIGURA 12 - ILUSTRAÇÃO DA GEOMETRIA DA 3º GERAÇÃO DO CT.	38
FIGURA 13 - ILUSTRAÇÃO DA GEOMETRIA DA 4º GERAÇÃO DO CT.	39
FIGURA 14 - ILUSTRAÇÃO DA GEOMETRIA DA 5º GERAÇÃO DO CT.	39

FIGURA 15 - ESQUEMATIZAÇÃO (A) CONVENCIONAL; (B) MULTI-CORTES.....	40
FIGURA 16 - ESQUEMA DA AMPOLA DE RAIOS X.	42
FIGURA 17 - INTERAÇÃO DOS FÓTONS COM A MATÉRIA EM FUNÇÃO DA ENERGIA DO FÓTON E DO NÚMERO ATÔMICO DO MATERIAL.....	43
FIGURA 18 - ILUSTRAÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO.	44
FIGURA 19 - ILUSTRAÇÃO DO EFEITO COMPTON.....	45
FIGURA 20 - ILUSTRAÇÃO DO EFEITO DE FORMAÇÃO DE PARES.....	46
FIGURA 21 - REPRESENTAÇÃO DA ATENUAÇÃO, FÓTONS INCIDENTES EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DE UM MEIO ABSORVEDOR DE COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO.....	47
FIGURA 22 - DOMÍNIOS TECTONO-MAGMÁTICOS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, POTENCIAIS ÁREAS-FONTE PARA OS SEDIMENTOS DO DELTA DO RIO PARAÍBA DO SUL.	50
FIGURA 23 - UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS.	54
FIGURA 24 - ESTROMATÓLITOS COLUNARES (GRUPO AÇUNGUI).....	58
FIGURA 25 - ESTROMATÓLITOS COLUNARES DE SHARK BAY, AUSTRÁLIA.....	60
FIGURA 26 - (A) ESTROMATÓLITO; (B) LAGOA SALGADA.	62
FIGURA 27 - DIFERENTES ESTRUTURAS ESTROMATOLÍTICAS (MODIFICADO GROTZINGER, 1989).	63
FIGURA 28 - CLASSIFICAÇÃO DE POROSIDADE.....	67
FIGURA 29 - CLASSIFICAÇÃO DE POROSIDADE.....	67
FIGURA 30 - ESTROMATÓLITO DIVIDIDO EM CAMADAS.	72
FIGURA 31 – IMAGEM BINARIZADA DO ESTROMATÓLITO.	73

FIGURA 32 - FOTOGRAFIA DA CABEÇA DE ESTROMATÓLITO À ESQUERDA E SEÇÃO TOMOGRÁFICA À DIREITA.....	74
FIGURA 33 - (A) SEÇÃO TOMOGRÁFICA. (B) BINARIZAÇÃO DAS SEÇÕES TOMOGRÁFICAS, POROS EM PRETO E ROCHA EM BRANCO. (C) BINARIZAÇÃO DAS SEÇÕES TOMOGRÁFICAS, POROS EM BRANCO E ROCHA EM PRETO.	75
FIGURA 34 - (A) IMAGEM SOMENTE DOS POROS (AZUL), (B) IMAGEM EM 3D DE TODA A ROCHA, (C) IMAGEM SOMENTE DA ROCHA (CINZA).....	76
FIGURA 35 - ESQUEMA DOS LOCAIS APROXIMADOS ONDE FORAM COLETADAS AMOSTRAS PARA SEREM CONFECCIONADAS AS LAMINAS PETROGRÁFICAS.....	78
FIGURA 36 – CAMADA INFERIOR (C3), COM POROSIDADE FORMADA ATRAVÉS DE BIOTURBAÇÃO (CIRCULO AMARELO).	80
FIGURA 37 - FOTOMICROGRAFIA DA CAMADA C3.	81
FIGURA 38 - FOTOMICROGRAFIA DA CAMADA C3	82
FIGURA 39 – RESULTADOS QUALITATIVOS DO VOLUME SELECIONADO DA AMOSTRA C3-1.	84
FIGURA 40 - RESULTADOS QUALITATIVOS DOS POROS DA AMOSTRA C3-1	85
FIGURA 41 - DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PORO EM 2D DA AMOSTRA C3-1.....	86
FIGURA 42 - RESULTADOS QUALITATIVOS DO VOLUME SELECIONADO DA AMOSTRA C3-2.	87
FIGURA 43 – RESULTADOS QUALITATIVOS DOS POROS DA AMOSTRA C3-2.	88
FIGURA 44 - DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PORO BIDIMENSIONAL DA AMOSTRA C3-2 (AZUL – ABAIXO QUE 500 μ M; VERMELHO – ACIMA DE 500 μ M; VERDE - MAIOR FREQUÊNCIA).....	89
FIGURA 45 – RESULTADOS QUALITATIVOS DO VOLUME SELECIONADO DA AMOSTRA C3-3..	90
FIGURA 46 - RESULTADOS QUALITATIVOS DOS POROS DA AMOSTRA C3-3.	91

FIGURA 47 - DISTRIBUIÇÃO MÉDIA DE TAMANHO DE PORO BIDIMENSIONAL DADO PELA MICRO-CT DA AMOSTRA C3-3 (AZUL – ABAIXO QUE 500 μ M; VERMELHO – ACIMA DE 500 μ M; VERDE - MAIOR FREQUÊNCIA).....	92
FIGURA 48 - LOCAL ONDE FORAM COLETADAS AMOSTRAS PARA ANÁLISE MINERALÓGICA.	94
FIGURA 49 - RESULTADOS DA DRX DE C3, RESSALTANDO OS PRINCIPAIS MINERAIS ENCONTRADOS.	95
FIGURA 50 - CAMADA INTERMEDIARIA LOCAL COM GRANDE CONCENTRAÇÃO DE GASTRÓPODE.	96
FIGURA 51 – FOTOMICROGRAFIA DA CAMADA C2	97
FIGURA 52 - FOTOMICROGRAFIA DA CAMADA C2.	98
FIGURA 53 - FOTOMICROGRAFIA DA CAMADA C2	99
FIGURA 54 – RESULTADOS QUALITATIVOS DO VOLUME SELECIONADO DA AMOSTRA C2-1..	100
FIGURA 55 - RESULTADOS QUALITATIVOS DOS POROS DA AMOSTRA C2-1	101
FIGURA 56 – DISTRIBUIÇÃO MÉDIA DE TAMANHO DE POROS BIDIMENSIONAL DA AMOSTRA C2-1 (AZUL - ABAIXO QUE 500 μ M; VERMELHO – ACIMA DE 500 μ M; VERDE - MAIOR FREQUÊNCIA).....	102
FIGURA 57 – RESULTADOS QUALITATIVOS DO VOLUME SELECIONADO DA AMOSTRA C2-2..	104
FIGURA 58 - RESULTADOS QUALITATIVOS DOS POROS DA AMOSTRA C2-2	105
FIGURA 59 – DISTRIBUIÇÃO MÉDIA DE TAMANHO DE POROS BIDIMENSIONAL DA AMOSTRA C2-2(AZUL - ABAIXO QUE 500 μ M; VERMELHO – ACIMA DE 500 μ M; VERDE - MAIOR FREQUÊNCIA).....	106
FIGURA 60 - RESULTADOS DA DRX DE C2, RESSALTANDO OS PRINCIPAIS MINERAIS ENCONTRADOS.	107

FIGURA 61 - LOCAL ONDE FORAM COLETADAS AMOSTRAS PARA ANÁLISE MINERALÓGICA.	108
FIGURA 62 - CAMADA SUPERIOR DO ESTROMATÓLITO. SETA VERDE: POROSIDADE CAUSADA POR BIOTURBAÇÃO BORING. SETA AZUL: POROSIDADE VUGULAR E INTRAPARTÍCULA. SETA VERMELHA: POROSIDADE CAVERNA. SETA AMARELA: POROSIDADE FENESTRAL.	109
FIGURA 63 - FOTOMICROGRAFIA DA CAMADA C1.	111
FIGURA 64 - FOTOMICROGRAFIA DA CAMADA C1	112
FIGURA 65 – FOTOMICROGRAFIA DA CAMADA C1	113
FIGURA 66 – RESULTADO DA ANÁLISE PONTUAL, ESPECTROS GERADOS POR EDS (À ESQUERDA) E IMAGENS DO MEV (À DIREITA).	114
FIGURA 67 - MAPEAMENTO PARA VERIFICAR OS ELEMENTOS QUÍMICOS NAS DUAS AMOSTRAS ANALISADA.	115
FIGURA 68 – RESULTADOS QUALITATIVOS DO VOLUME SELECIONADO DA AMOSTRA C1-1.	117
FIGURA 69 - RESULTADOS QUALITATIVOS DOS POROS DA AMOSTRA C1-1.	118
FIGURA 70 - DISTRIBUIÇÃO MÉDIA DE TAMANHO DE POROS BIDIMENSIONAL DA AMOSTRA C1-1.	119
FIGURA 71 - RESULTADOS QUALITATIVOS DO VOLUME SELECIONADO DA AMOSTRA C1-2..	120
FIGURA 72 – RESULTADOS QUALITATIVOS DOS POROS DA AMOSTRA C1-2.	121
FIGURA 73 – DISTRIBUIÇÃO MÉDIA DE TAMANHO DE POROS BIDIMENSIONAL DA AMOSTRA C1-2 (AZUL - ABAIXO QUE 500 μm ; VERMELHO – ACIMA DE 500 μm ; VERDE - MAIOR FREQUÊNCIA).	122

FIGURA 74 - RESULTADOS QUALITATIVOS DO VOLUME SELECIONADO DA AMOSTRA C1-3.	123
FIGURA 75 - RESULTADOS QUALITATIVOS DOS POROS DA AMOSTRA C1-3..	124
FIGURA 76 – DISTRIBUIÇÃO MÉDIA DE TAMANHO DE POROS BIDIMENSIONAL DA AMOSTRA C1-3 (AZUL - ABAIXO QUE 500 μM ; VERMELHO – ACIMA DE 500 μM ; VERDE - MAIOR FREQUÊNCIA).....	125
FIGURA 77 - LOCAL ONDE FORAM COLETADAS AMOSTRAS PARA ANÁLISE MINERALÓGICA.	126
FIGURA 78 - RESULTADOS DA DRX DE C1, RESSALTANDO A COMPOSIÇÃO COM PREDOMINÂNCIA DE CALCITA MAGNESIANA.	127
FIGURA 79 - QUADRO DE INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS.	129

LISTAS DE TABELAS

TABELA 1 - QUANTIFICAÇÃO DA POROSIDADE NA CABEÇA ESTROMATOLÍTICA	77
TABELA 2 - QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME SELECIONADO NA CAMADA INFERIOR (C3) DADO PELA MICRO-CT	83
TABELA 3 - MINERAIS IDENTIFICADOS NA DRX DA C3	93
TABELA 4 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS VOLUMES SELECIONADOS DA CAMADA INTERMEDIÁRIA (C2).....	102
TABELA 5 - MINERAIS IDENTIFICADOS NA DRX DA C2	107
TABELA 6 – QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME SELECIONADO NA CAMADA SUPERIOR (C1) DADO PELA MICRO-CT	118
TABELA 7 - MINERAIS IDENTIFICADOS POR DRX DA C1	126
TABELA 8 - MINERAIS IDENTIFICADOS POR DRX NAS DIFERENTES CAMADAS	130

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o estudo das rochas carbonáticas estromatolíticas tiveram um grande enfoque devido à descoberta dos depósitos de petróleo do Pré-sal, além do fato que cerca de 50% do petróleo encontrado no mundo estão armazenados em rocha carbonáticas (SPADINI & MARÇAL, 2005). As rochas caracterizadas como armazenadoras de petróleo nas Bacias de Campos (Grupo Lagoa Feia, Formação Macabu) e de Santos (Grupo Guaratiba, Formação Barra Velha), são rochas carbonáticas estromatolíticas e laminitos de origem microbiais depositados em ambiente marinho raso (MOREIRA *et al.*, 2007 e WINTER *et al.*, 2007).

A lagoa Salgada abriga raro caso de estromatólitos recentes do Brasil e pode ser comparada com outras poucas ocorrências semelhantes no mundo como Shark Bay (Austrália, Pink ou Spencer Lake (Austrália), Bahamas, Golfo Pérsico, Solar Lake (Israel), Salt Lake (EUA), Green Lake (EUA), Yellowstone National Park (EUA), Florida (EUA), Ilha de Hai-Nan (China) e Golfo do México, entre outros.

Os estromatólitos da Lagoa Salgada em parte podem ser considerados análogos das rochas reservatório do Pré-sal. O estudo de rochas reservatório em afloramentos análogos constitui a principal ferramenta utilizada na compreensão das anisotropias estratigráficas para definição da melhor estratégia de exploração.

Rochas reservatórios de origem carbonáticas do Pré-sal apresentam grande porosidade, porém mostram anisotropia. Esta característica criou a demanda para o entendimento da gênese e diagênese das rochas bioconstruídas. Sendo estas, possivelmente formada grande parte por cianobactérias as quais podem influenciar nos processos de sedimentação terrígena, evaporítica e carbonática.

Apesar de existirem alguns estudos detalhados de rochas estromatolíticas da Lagoa Salgada como de Lemos (1996), persiste ainda a necessidade de uma avaliação quantitativa da variação da porosidade contida nestas bioconstruções. A necessidade em entender o arcabouço poroso dos elementos bioconstruídos é extremamente importante para entender as rochas reservatório. Levando em conta que existe uma carência de trabalhos que abordam esse tema, pelo fato de ser bastante recente.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho visa caracterizar a porosidade em rochas estromatolíticas recentes, encontradas na Lagoa Salgada – RJ, com a finalidade de distinguir a tipologia, morfologia e morfometria da porosidade, bem como realizar a quantificação dos poros conectados e isolados presentes. Com objetivo de auxiliar o reconhecimento geológico da porosidade em rochas-reservatório de origem carbonática, notadamente como as encontradas no Pré-sal.

A meta deste projeto é estudar os tipos de porosidade em rochas estromatolíticas recentes como possível análogo das rochas de origem microbial.

Para isto foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Descrever a rocha estromatolítica;
- Quantificar a porosidade total do estromatólito;
- Descrever mesoscópicamente os tipos de porosidade;
- Distinguir nas amostras a variação característica das porosidades de cada camada;
- Definir os principais minerais existentes no estromatólito;
- Descrever detalhadamente os poros nas diferentes camadas definidas em meso e microescala;
- Quantificar, por microtomografia, o volume e a conectividade dos poros nas amostras de detalhe, e distribuição dos poros;
- Definir a morfologia e morfometria dos poros em meso e microescala;
- Comparar a variação da quantificação da porosidade nas diferentes técnicas analíticas utilizadas (microtomografia, tomografia médica e petrografia).

1.2 ÁREA DE TRABALHO

A lagoa Salgada situa-se no sudeste do Brasil, no litoral Norte do estado do Rio de Janeiro, está entre os municípios de Campos de Goytacazes e São João da Barra, nas coordenadas geográficas 21°54'10"S e 41°00'30"W (Silva e Silva, 2002). A lagoa pode ser acessada da cidade do Rio de Janeiro pela estrada nacional BR-101(Rio de Janeiro/Campos - 290 Km). Em seguida pela rodovia RJ- 216 (Campos/Cabo de São Tomé – 50 Km) (FIGURA 1).

Encontra-se na parte terrestre da Bacia de Campos, sendo integrante do complexo deltaico do rio Paraíba do Sul. A Bacia de Campos tem cerca de 100 mil Km² e se estende do Estado do Espírito Santo nas imediações da cidade de Vitória, até Arraial do Cabo, no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro. Ao sul do rio Paraíba do Sul, onde está posicionada a lagoa é uma planície arenosa formada por cristas praias holocênicas (RAJA & MILANI, 1990). Nesta região são encontrados estromatólitos composto de material carbonático precipitado ou trapeado rico em matéria orgânica. Podem-se encontrar nódulos de sílica de tamanho na ordem de centímetros e minerais evaporíticos, essa construção apresenta cimentação superficial frágil e alta porosidade (SRIVASTAVA & ROCHA, 2002).

Segundo Martin *et al.* (1993), a lagoa foi formada depois da fase de erosão costeira e associada com a oscilação do nível do mar entre 3900 e 3600 anos A.P. Isso se deu após o deslocamento da barreira arenosa em direção ao continente.

Rodrigues *et al.* (1981) realizou análise fauna de foraminíferos em testemunhos de sondagem e constatou que a lagoa sofre passagem de um ambiente marinha para lagunar.

Segundo Lemos (1996) a idade da lagoa esta entre 3060 a 2930 anos A.P., a datação foi realizada com conchas coletadas nos sedimentos da seqüência marinha.

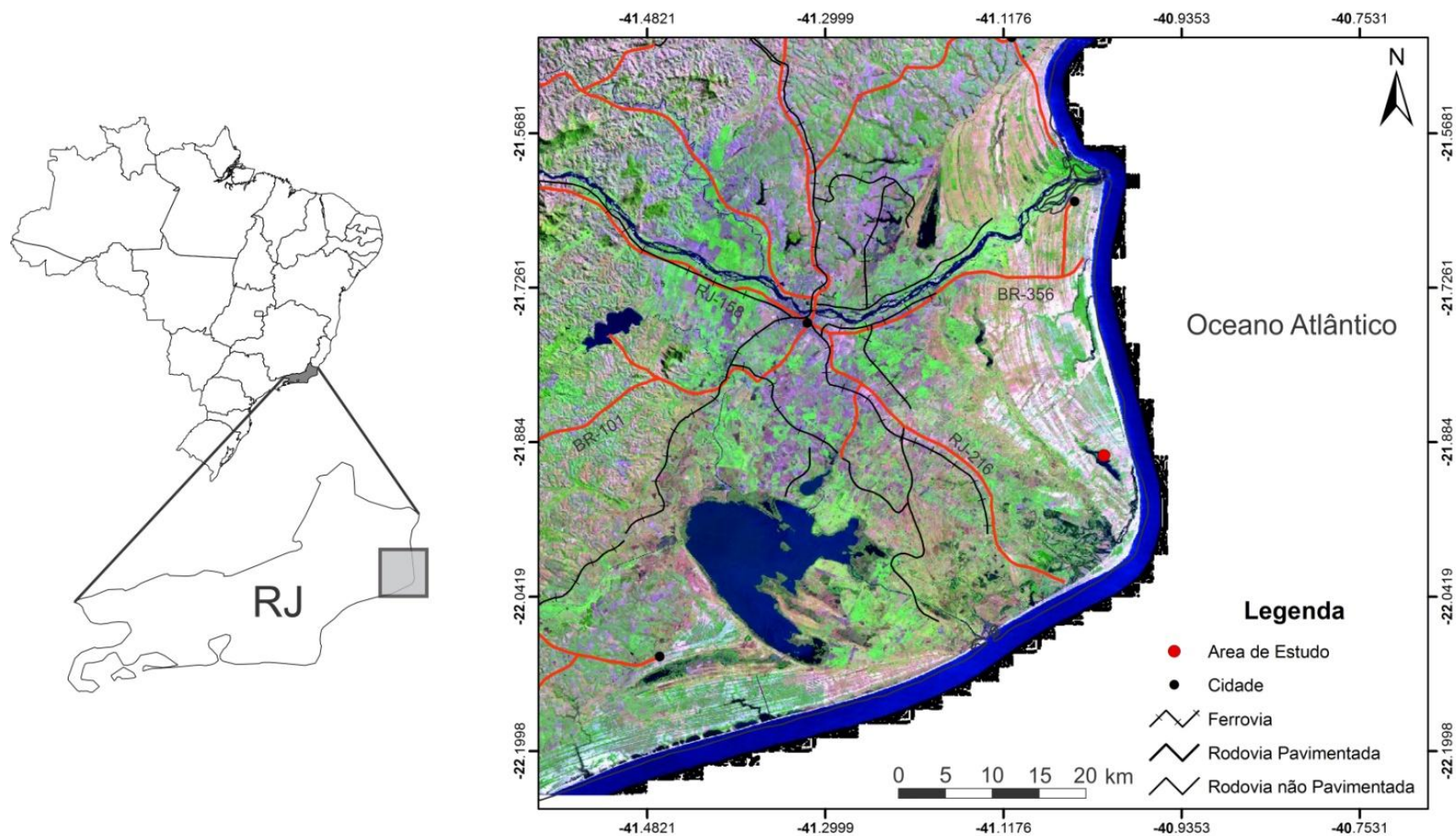


FIGURA 1 - Mapa da região norte do Estado do Rio de Janeiro, destacando a Lagoa Salgada.

FONTE: Google Earth (acessado: 22/03/2012).

2 MÉTODOS E TÉCNICAS

Para o estudo da porosidade foi utilizada a técnica de tomografia computadorizada de alta resolução (técnica não destrutiva), que permite a obtenção de dados quantitativos e qualitativos em três dimensões do volume, forma, tamanho, conectividade e distribuição dos poros. A análise microtomográfica pode ser utilizada para complementar as avaliações bidimensionais adquiridas pela análise petrográfica.

Para a compreensão de porosidade em estromatólitos recentes procurou-se sistematizar o trabalho como uma descrição petrográfica detalhada, levantamento bibliográfico, compilação de dados sobre porosidade (tipologia, morfologia e morfometria) de estromatólitos recentes, e técnicas de determinação de porosidade.

Para identificar a tipologia dos poros adotou-se o modelo de classificação de porosidade de Choquette e Pray (1970), para descrição em meso e microescala.

2.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

A amostra estudada foi coletada na Lagoa Salgada–RJ, pelo Professor Dr. José Manoel Reis Neto. Primeiramente foi levada para uma análise tomográfica no CENPES, e posteriormente ocorreu o processo de preparação da amostra. Foi realizado um corte no estromatólito, na vertical como pode ser visto na FIGURA 2, com a finalidade de visualizar a estrutura interna, para descrição dos tipos e quantificação (indireta) de porosidade em mesoescala. Posteriormente, foram selecionados alguns locais, na amostra, que fossem representativos para ser confeccionadas as laminas petrográficas.

Para análise microtomográfica foram coletadas oito amostras em locais distintos, com um formato aproximado de um cubo ou um paralelepípedo, com dimensões que variam de 1,0 cm a no máximo 5,0 cm. As amostras foram cortadas no laboratório de laminação do Departamento de Geologia da UFPR.

Para análise mineralógica foram coletadas amostras em nove regiões distintas, com o auxílio de broca.

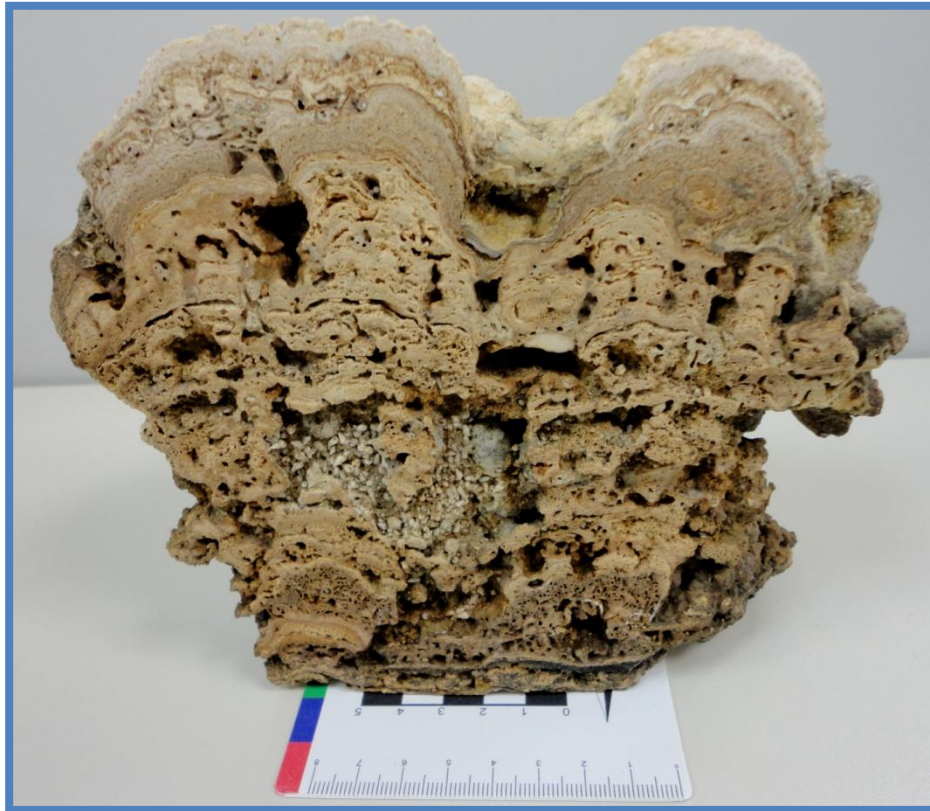


FIGURA 2 – Rocha estromatolítica cortada na vertical.

2.2 DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

Para descrição petrográfica foram confeccionadas doze laminas delgadas no laboratório de laminação da PETROBRAS na cidade de Santos - SP.

O estudo das seções delgadas foi realizado através do microscópio binocular de luz transmitida e refletida com polarização Olympus BX60 (FIGURA 3) para classificar a rocha, tipos de porosidade e arcabouço da rocha. A análise do tipo de porosidade foi feita, com o auxílio, do modelo de classificação de porosidade de Choquette e Pray (1970).



FIGURA 3 - Microscópio Olympus BX60 (laboratório de análise de minerais e rochas – LAMIR/UFPR).

O processo de confecção das laminas iniciou-se com as rochas cortadas com arestas de aproximadamente 4,0 cm. Em seguida, foram impregnadas com resina e tingidas com corante azul, para distinguir entre porosidade original e artificial (artefatos), produzidos durante o corte das amostras.

As amostras foram submetidas ao processo de secagem em estufa durante um tempo aproximado de 24h. Em seguida foram colocadas em copos de plásticos para efetuar a impregnação, onde foi adicionada uma mistura aproximada de 80 ml de resina epóxi, 8,0 ml de catalisador, 11,2 ml de álcool e corante azul. Posteriormente, foram parcialmente cobertas por resina e colocada em um ressecador de vidro e deixada sob uma pressão inferior à atmosférica, durante 40 minutos. O processo é repetido até toda a amostra estar totalmente coberta pela resina. Em seguida levadas para secagem em estufa por 24 horas. Finalmente, foram encaminhadas para o procedimento normal de laminação.

2.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

O princípio da difração de raios X é caracterizado de uma maneira básica pela incidência de um feixe monocromático sobre a superfície de um material, o qual será espalhado (difratado) e posteriormente detectado por um dispositivo.

A distribuição atômica regular dos materiais cristalinos é responsável pelo espalhamento das ondas de raios X que incidem na amostra, desde que o espalhamento ocorra segundo a Lei de Bragg:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

Onde:

d = distancia entre os planos atômicos de um cristal

λ = comprimento de onda incidente

θ = ângulo de incidência

n = número inteiro

O feixe difratado é expresso através de picos registrados num espectro de intensidade *versus* ângulo 2θ ou “d”, constituído o padrão difratométrico ou difratograma (FIGURA 4). As intensidades obtidas em ângulo 2θ correspondem a difração do feixe incidente por um determinado conjunto de planos do cristal que possuem a mesma distância interplanar.

Cada composto cristalino apresenta um padrão difratométrico característico, permitindo sua identificação através das posições angulares e intensidades relativas dos picos difratados.

O difratômetro para determinação mineralógica utilizado foi PHILIPS, modelo PW1830 (FIGURA 5), com ânodo de Cu e gerador de tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. Ângulos de varredura que varia de 2° a $70^\circ 2\theta$.

O software utilizado para interpretação dos dados é X' Pert High Score, da PHILIPS e o método para obtenção do percentual semi-quantitativo dos minerais é RIR (Reference Intensity Ratio).

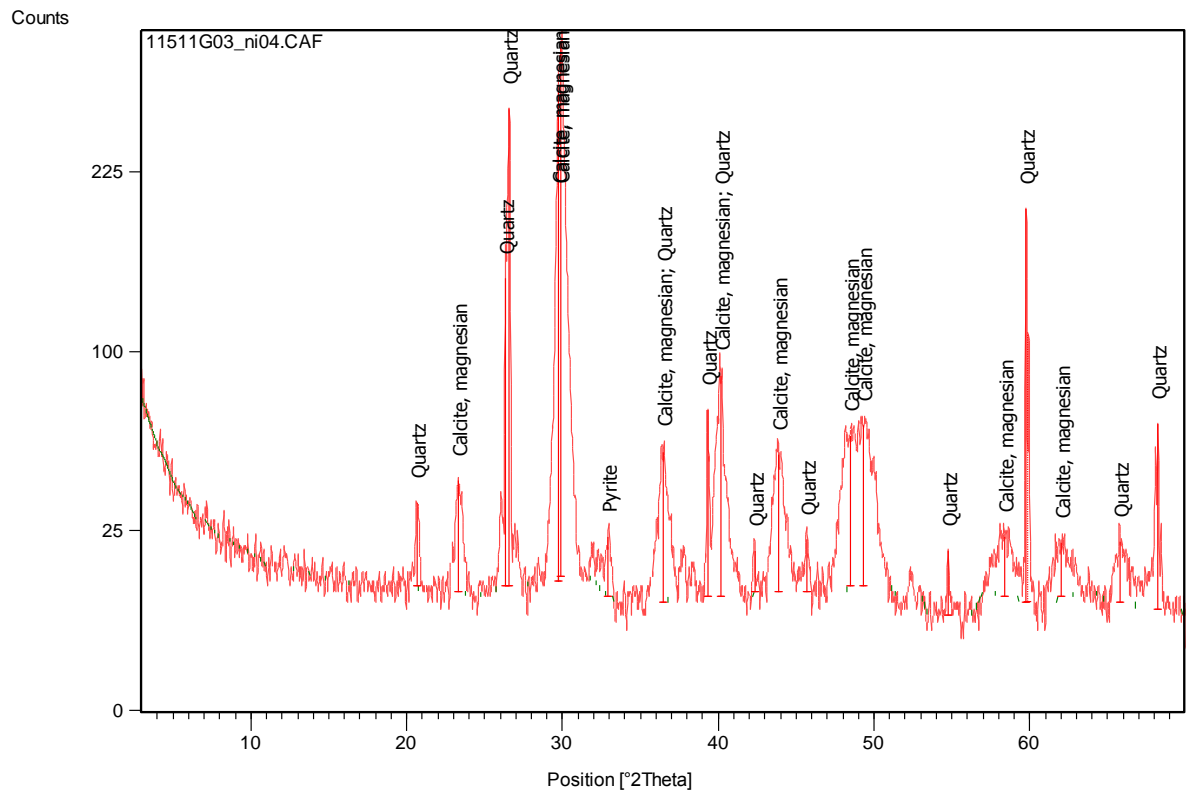


FIGURA 4 - Exemplo de um difratograma e os minerais correspondentes com seus picos.



FIGURA 5 - Preparação para análise mineralógica.

O percentual semi-quantitativo obtido pelo software é em seguida recalculado em 100%, obtendo um resultado indireto da quantidade equivalente do mineral na amostra e pode ser representado através de gráficos (FIGURA 4), esse procedimento foi adotado nesse trabalho. O resultado adquirido da quantidade ou percentual de cada mineral tem uma margem de erro, pelo fato de ter a interpretação humana junto com as sugestões do software, não sendo uma resposta absoluta.

2.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas; valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançado são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1 nm (NAGATANI *et al.* 1987). Outra característica importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo. Permite, também, o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica.

O princípio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. Por um sistema de bobinas de deflexão, o feixe pode ser guiado de modo a varrer a superfície da amostra segundo uma malha retangular. O sinal de imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. O sinal recolhido pelo detector é utilizado para modular o brilho do monitor, permitindo a observação.

A maioria dos instrumentos usa como fonte de elétrons um filamento de tungstênio (W) aquecido, operando numa faixa de tensões de aceleração de 1 a 50

kV. O feixe é acelerado pela alta tensão criada entre o filamento e o ânodo. Ele é, em seguida, focalizado sobre a amostra por uma série de três lentes eletromagnéticas com um spot menor que 4 nm. O feixe interagindo com a amostra produz elétrons e fótons que podem ser coletadas por detectores adequados e convertidas em um sinal de vídeo.

Quando o feixe primário incide na amostra, parte dos elétrons difunde-se e constitui um volume de interação cuja forma depende principalmente da tensão de aceleração e do número atômico da amostra. Neste volume, os elétrons e as ondas eletromagnéticas produzidos são utilizados para formar as imagens ou para efetuar análises físico-químicas.

Para serem detectadas, as partículas e/ou os raios eletromagnéticos resultantes da interação do feixe eletrônico com a amostra devem retornar à superfície da amostra e daí atingirem o detector. A profundidade máxima de detecção, portanto, a resolução espacial, depende da energia com que estas partículas ou raios atingem o detector, ou são capturadas pelo mesmo. Por exemplo: elétrons retroespalhados possuem maior energia do que os elétrons secundários, assim, o detector de elétrons retroespalhados irá operar na faixa de energia maior e o de elétrons secundários na faixa menor.

A imagem formada a partir do sinal captado na varredura eletrônica de uma superfície pode apresentar diferentes características, uma vez que a imagem resulta da amplificação de um sinal obtido de uma interação entre o feixe eletrônico e o material da amostra. Diferentes sinais podem ser emitidos pela amostra. Dentre os sinais 12 emitidos, os mais utilizados para obtenção da imagem são originários dos elétrons secundários e/ou dos elétrons retroespalhados.

A imagem formada a partir do sinal captado na varredura eletrônica de uma superfície pode apresentar diferentes características, uma vez que a imagem resulta da amplificação de um sinal obtido de uma interação entre o feixe eletrônico e o material da amostra. Diferentes sinais podem ser emitidos pela amostra. Dentre os sinais emitidos, os mais utilizados para obtenção da imagem são originários dos elétrons secundários e/ou dos elétrons retroespalhados.

O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi o JEOL modelo JSM-6010LA, a voltagem utilizada foi de 7 KV. Foi analisada duas lamina petrográficas, que foram metalizadas com uma liga de ouro e paládio.

2.6 TOMOGRAFIAS COMPUTADORIZADA DE RAIOS X

Tomografia Computadorizada de Raios X (CT)

Para obtenção de dados quantitativos e qualitativos da porosidade do estromatólito foi analisada a amostra inteira no tomógrafo médico no CENPES, marca General Electric modelo Bright Speed de 16 canais (16 cortes para cada rotação) (FIGURA 6). A resolução é fixa de 500 μm pelo fato dos detectores serem fixos. A imagem tomográfica produzida pelo equipamento está no formato DICOM, que transforma para BMP pelo programa Conquest.

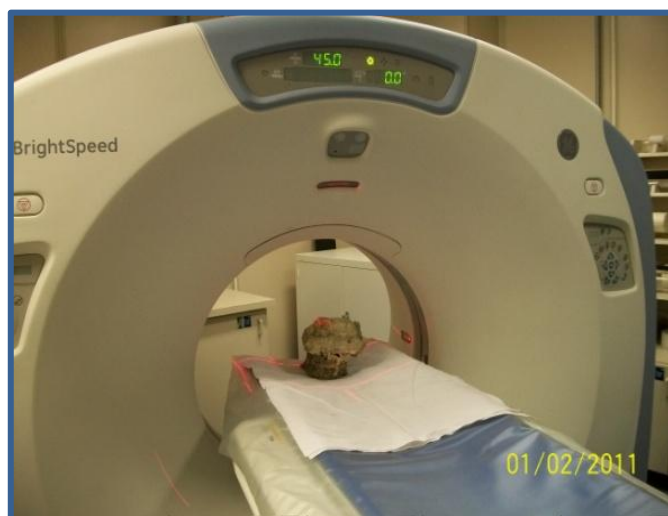


FIGURA 6 - Cabeça estromatolítica sendo analisada no tomografo Bright Speed.

Microtomografia Computadorizada de Raios X (micro-CT)

Para uma análise mais detalhada o estromatólito foi cortado em cubos de tamanhos de aproximados de 1,0 cm, para ser realizado a micro-CT e obter dados

quantitativos e qualitativos do tamanho, conectividade e forma dos poros. O equipamento utilizado foi o microtomógrafo da fonte de raios X da SkyScan (FIGURA 7), modelo 1172, instalado no LAMIR/UFPR, que contém uma câmera de 10 megapixels (4000 x 2300) com CCD de 12 bits acoplado a cintilador por fibra ótica, e do compartimento onde o porta-amostra deve ser inserido com o material a ser analisado. Os programas usados para processos analíticos e tratamento de dados que o equipamento fornece são os NRecon, CTAn, CTVol, CTvox e Dataviewer.

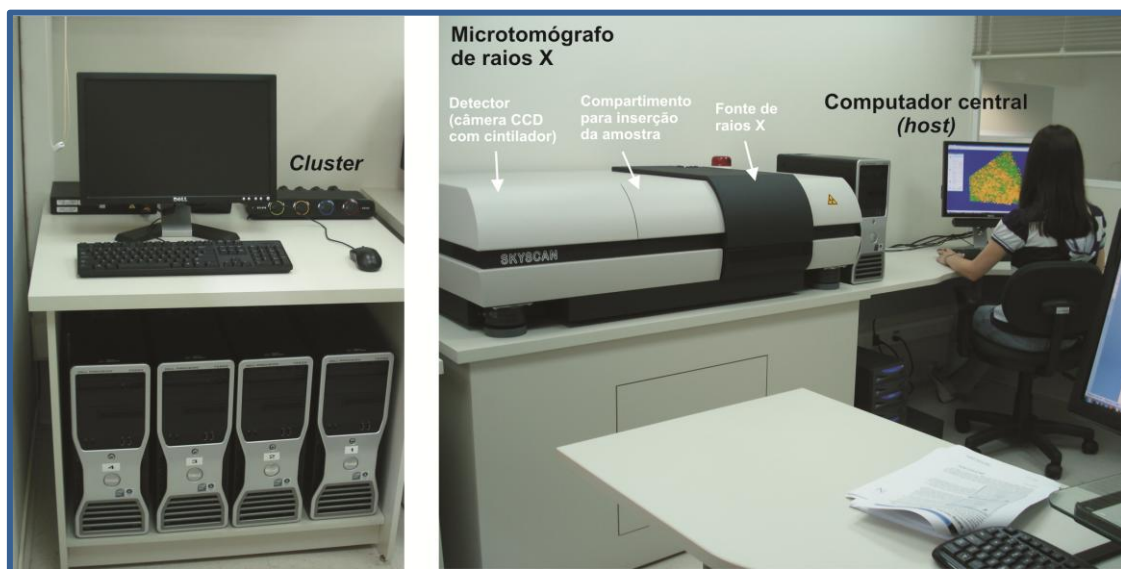


FIGURA 7 - Laboratório de microtomografia de raios x no LAMIR/UFPR. Observar posicionamento da fonte de raios X, do detector, e do compartimento onde as amostras são inseridas.

A microtomografia computadorizada de raios X é uma técnica que pode auxiliar e complementar a petrografia, pois é possível obter dados quantitativos e qualitativos em três dimensões do volume, forma, tamanho, conectividade e distribuição dos poros. É uma técnica que permite verificar imagens detalhadas da região interna de materiais através da absorção da radiação que ocorre de forma diferenciada dependendo da composição química e densidade da amostra.

A imagem microtomográfica é constituída a partir das diferentes densidades, e para descobrir a densidade de cada ponto da amostra é feito a medição da atenuação de radiação em cada ponto, que será atravessado por feixes de raios X em diferentes ângulos (SOARES & LOPES, 2001).

O microtomógrafo computadorizado reconstrói a imagem completa da amostra em três dimensões a partir do empilhamento da seção em duas dimensões. O procedimento analítico necessário para se obter a quantificação e a imagem em tridimensional divide-se em três etapas: aquisição das imagens, reconstrução das seções microtomográficas e tratamento dos dados.

Na aquisição da imagem é necessário colocar a amostra dentro do microtomógrafo de forma que ela esteja bem fixa, e durante todo o procedimento não haja nenhum tipo de movimentação, para que se tenha uma boa imagem. Em seguida, acionando-se a fonte de raios X, é possível observar o espectro de transmissão pela amostra. O programa possibilita fazer alguns ajustes que irão variar dependendo da amostra que são: corrente, tensão, filtro e resolução da câmera. A corrente irá influenciar na quantidade de energia, no número de elétrons, quanto maior a corrente maior será o feixe de fótons gerado. A diferença de potencial acelera os elétrons que atingem o alvo (ânodo), e esses elétrons são gerados pelo cátodo. Os fótons de raios X são produzidos pelo bombardeamento de elétrons de alta velocidade em um alvo. A intensidade dos raios X produzidos é proporcional ao número atômico do material bombardeado e ao número de elétrons que bombardeiam o alvo. Por outro lado, a energia dos fótons de radiação X depende da diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo.

O equipamento usado apresenta algumas opções de filtros: sem filtro, filtro de Al 0,5 mm, e filtro de Al+Cu, além da possibilidade de inserção de outros. Esses filtros são utilizados para eliminar as radiações de baixa energia e pode causar o efeito de “endurecimento dos feixes”, e com isso, pode-se obter uma imagem de má qualidade.

O tubo e o detector devem estar alinhados, o mau alinhamento provoca erro nos valores calculados e conseqüentemente gera artefatos. Os artefatos são uma espécie de “borramento” na imagem, podem ser em forma de listas ou anéis e são causados por vários fatores.

Após a aquisição das imagens de raios X é executada a reconstituição das seções microtomográficas, que são na realidade um conjunto de números, transformados em tons de cinza, que informam as diferentes densidades. Para se descobrir os valores de cada densidade o tomógrafo realiza a medição da atenuação de radiação que a amostra provoca quando é atravessada por um feixe de raios X.

Como esta atenuação é feita por toda a amostra, é necessário que se façam varias exposições em diferentes ângulos. Assim, se obtém uma grande quantidade de dados para que o computador possa definir ponto a ponto da imagem, o seu valor de atenuação ou densidade. A transformação desses valores nos vários níveis de cinza análogos cria uma imagem visual da seção transversal da área varrida.

Segundo Soares e Lopes (2001) os valores da atenuação para cada conjunto de projeções são registrados no computador e a imagem é reconstruída através de um processamento computacional complexo. Como cada material tem uma capacidade de absorção diferente, estruturas internas diferentes serão identificáveis na imagem. Essa imagem é definida através de números finitos de valores de atenuação correspondente ao objeto varrido e organizado na forma de uma matriz. O tamanho da matriz influencia na qualidade da resolução da imagem. Matrizes maiores significam mais pontos e *pixel* de menor área, ou seja, melhor resolução da imagem. No entanto um maior tempo de aquisição dos dados.

Após o termino da reconstrução da imagem é necessário analisar e tratar os dados. Nessa etapa são utilizados alguns *softwares*. No microtomografo do Lamir (SkyScan) têm-se alguns *softwares* para tratamento e análise dos dados, que são: programa Dataviewer, CTVox, CTVol e o CTAn. Esses programas permitem reconstrução da imagem em três dimensões. Para análise de rochas onde se deseja quantificar porosidade e conectividade esses programas possibilitam a visualização interna com uma imagem tridimensional. No programa CTVol é possível fazer vídeo no formato AVI das seções microtomográficas passando de uma para outra, o que auxilia na visualização interna de poros e estruturas. O CTAn é um programa que permite fazer a quantificação de cada material identificado (rocha, poro, um material muito denso) isoladamente, através da binarização de cada material (FIGURA 8). Em seguida faz a quantificação e a preparação para se construir a imagem em 3D no CTVol (FIGURA 9). A binarização ou separação de fases consiste no processo de transformar uma imagem com 256 níveis de cinza (todas as imagens serão digitalizadas com essa característica) em uma imagem binária, isto é, branca e preta.

Segundo Fernandes (2009) o programa CTAn não se mostrou adequado para ser realizado a determinação da distribuição do tamanho dos poros. O programa CTAn visualiza a rede porosa como apenas uma área continua, ou seja,

se todos os poros estiverem interligados entre si em uma imagem, o *software* irá apresentar uma distribuição de tamanho de poros com apenas um poro, com diâmetro referente a área total, o que não é real. Portanto, nesse trabalho, a distribuição do tamanho de poros foi feita através do *software* IMAGO que se mostra, mas adequado para esse tipo de análise.

A importância do método é proveniente da possibilidade de visualizar a estrutura interna da rocha de forma não destrutiva e da quantificação automática dos dados. Além do que, todas as fases podem ser analisadas individualmente, caso tenha fases contrastantes de atenuação.

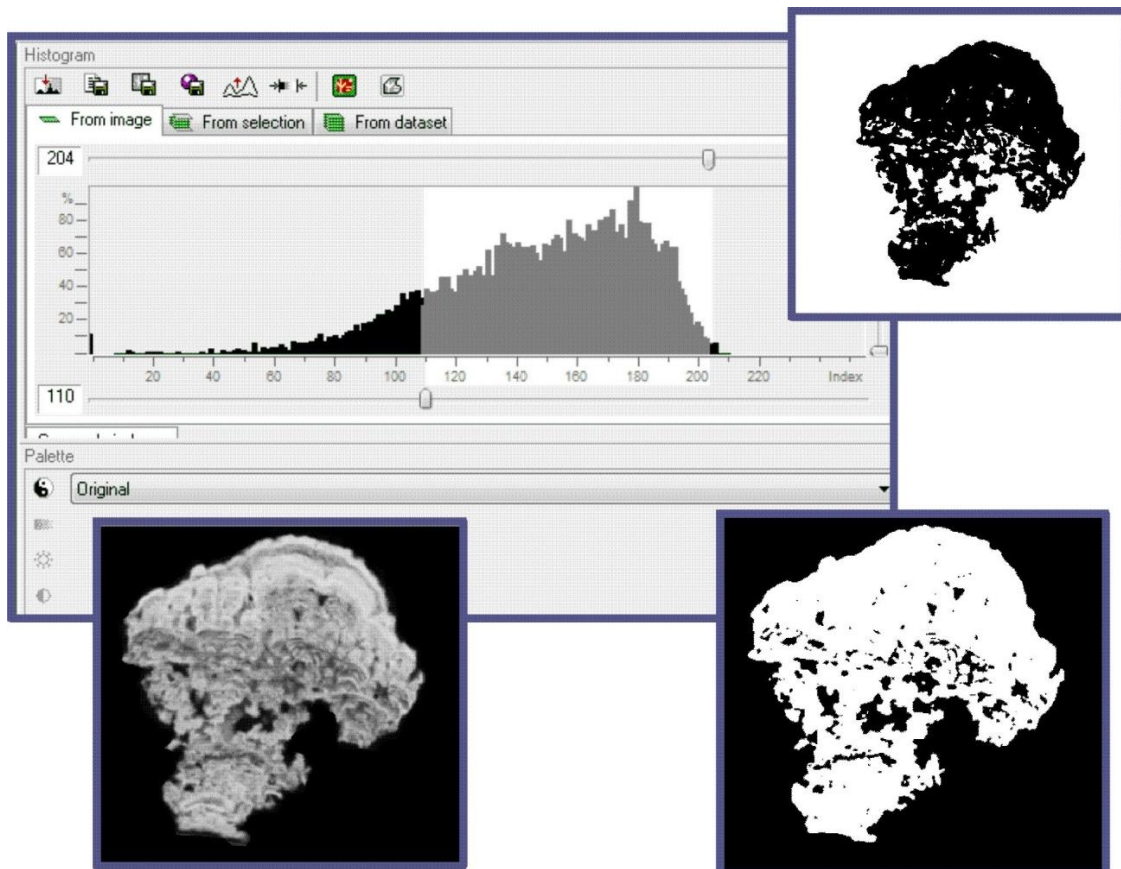


FIGURA 8 - Imagem do programa CTAn, com a seção tomográfica e a seção binarizada.

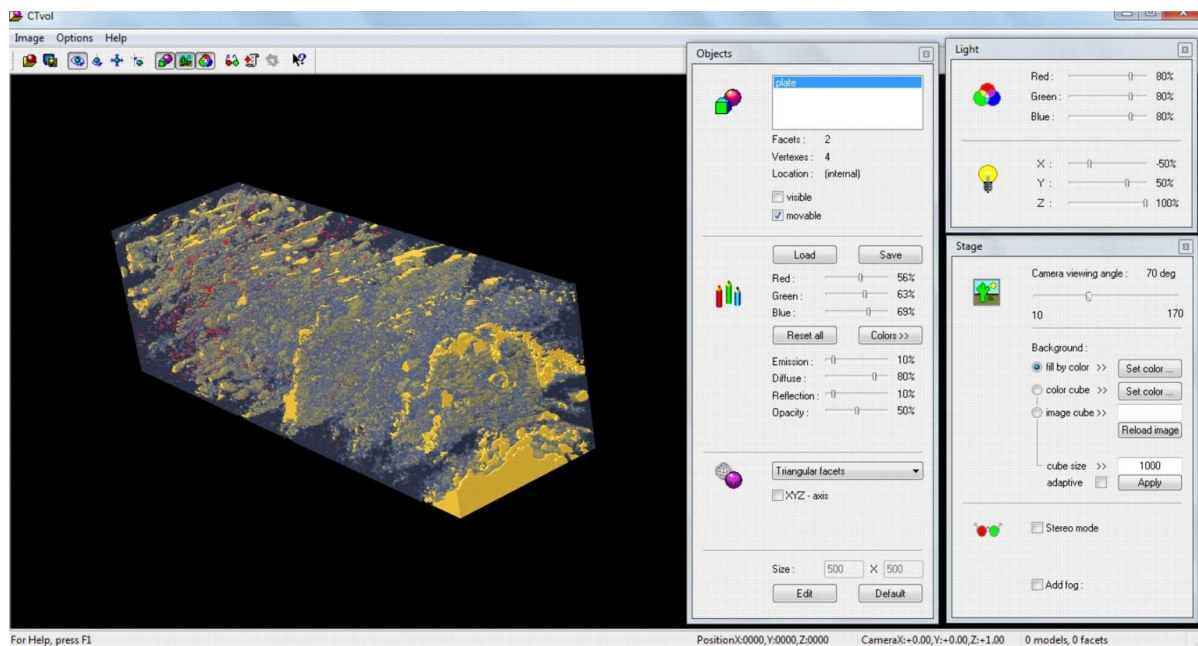


FIGURA 9 - Imagem do programa cvol com imagem construída em 3D.

2.6.1 Histórico da Evolução da Tomografia Computadorizada de Raios X (CT).

Em 1895 com a descoberta dos raios X, houve um grande avanço na área médica com o desenvolvimento de técnicas de diagnósticos com raios X. Porém, como não se sabia muito sobre esses raios, muitas pessoas, na maioria cientistas, morreram devido à exposição excessiva a radiação.

Godfrey Newbold Hounsfield (1919-2004), em 1967, desenvolveu a técnica de tomografia computadorizada (CT), quando trabalhava na empresa britânica EMI Ltda, onde foi montado o primeiro CT. O sul africano Allan M. Cormack, desenvolveu a matemática necessária para construção das imagens tomográficas. Hounsfield e Cormack foram agraciados pelo trabalho desenvolvido, em 1979, com o Premio Nobel de Fisiologia e Medicina.

A técnica CT permite obter imagem de seções de um corpo, de forma não destrutiva. A princípio a técnica ficou focada para diagnóstico médico, atualmente é utilizada em pesquisas científicas e na indústria.

A tomografia computadorizada passou por uma evolução dividida em algumas gerações bem definidas. Cada etapa foi caracterizada por uma geometria particular de aquisição dos dados, que tinha como objetivo reduzir o tempo de varredura (SEERAM, 2001).

Na história da tomografia computadorizada, diferentes tipos de tomógrafos têm sido criados. Os tomógrafos de primeira geração (EMI Mark I) foram aqueles criados por Hounsfield em 1972. O padrão de varredura destes tomógrafos de primeira geração consistia de uma translação de tubo de raios X e do detector (um ou no máximo dois) em conjunto (FIGURA 10).

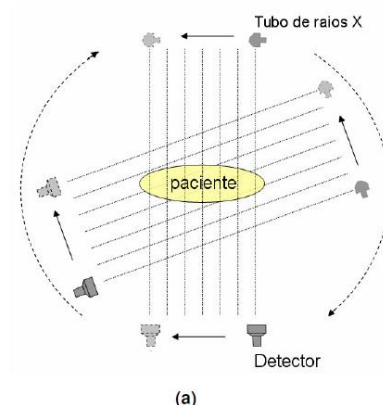


FIGURA 10 - Ilustração da geometria da 1ª geração do CT.

FONTE: Araújo (2008).

O campo de radiação era colimado de modo a produzir um pequeno feixe cilíndrico, que após passar a cabeça do paciente atinge o detector. O sistema de detecção consiste de um cristal de NaI e uma fotomultiplicadora. Os feixes de radiação efetuam rotações de 1° , esse procedimento é repetido até completar 180° . O sistema gastava, para um corpo de 24 cm, 7 minutos para reconstruir a imagem de 80×80 pixel, sendo a espessura da secção de 13 mm.

Na segunda geração de tomógrafos, ao invés de um detector, era um conjunto de detectores colocados do outro lado do tubo de raios X, de forma que o feixe de raios X formava um leque e não apenas uma linha única de aquisição de dados (FIGURA 11). Com isso, para um feixe de abertura de 10 graus, eram necessários somente 18 movimentos de rotação e translação para reconstruir a imagem, portanto o tempo de varredura passou para 10 a 20 segundos.

Na segunda geração já passou a ser possível efetuar imagens de outras partes do corpo além da cabeça. Mas ainda, houve problemas com os artefatos, devido a movimentos involuntários do paciente.

O primeiro tomógrafo de segunda geração foi lançado, em 1974, pela empresa americana OHIO NUCLEAR e, depois deste, outros tomógrafos de segunda geração mais aperfeiçoados e com maior número de detectores foram lançados no mercado dando um impulso muito grande à CT de corpo inteiro, pois eram mais rápidos e diminuía acentuadamente os artefatos de movimento.

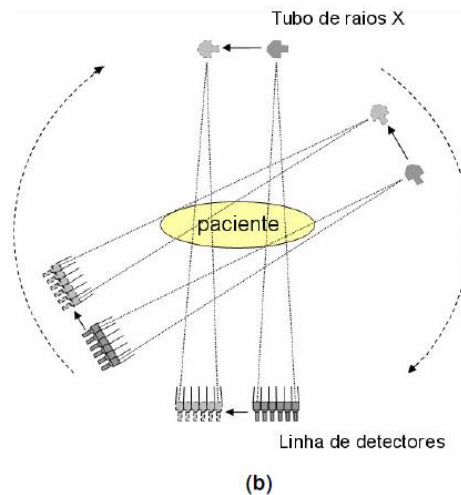


FIGURA 11 - Ilustração da geometria da 2ª geração do CT.

FONTE: Araújo (2008).

Na terceira geração de tomógrafos, o movimento de translação foi eliminado, mantendo-se apenas o movimento de rotação e o feixe de raios X foi ampliado graças às novas tecnologias do tubo de raios X. Houve um grande aumento no número de detectores, mudando-se completamente a geometria de varredura. O tubo e detectores descrevem um movimento de rotação em torno do paciente, o leque de radiação atravessa o paciente e chega atingindo uma bateria semicircular de detectores, o número de detectores na matriz pode ir de 300 a 1200 (FIGURA 12). Devido às grandes dimensões dos feixes que atinge o paciente nestes sistemas, um número maior de fótons espalhados pode atingir os detectores, degradando a qualidade das imagens produzidas. Para evitar esse efeito, um colimador pós-paciente precisa ser utilizado.

O tempo de aquisição tornou-se bem mais rápido e a qualidade da imagem sofreu uma melhora bastante significativa. A trajetória de rotação dos sistemas passou a ser de 360°, o que diferencia das outras gerações.

A terceira geração de tomógrafos foi desenvolvida em 1974 pela firma Artronix, mas só colocada em prática em 1975 pela GE. Posteriormente, em 1977, a Philips melhorou a terceira geração de tomógrafos introduzindo o princípio do "geometric enlargement" que contribuiu para o desenvolvimento das técnicas de alta resolução nos tomógrafos subseqüentes.

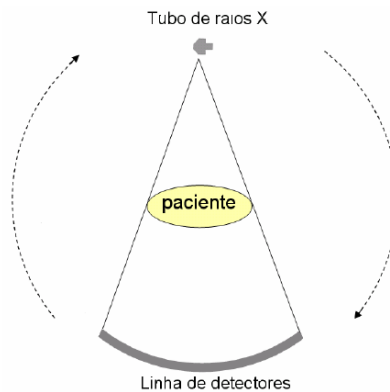


FIGURA 12 - Ilustração da geometria da 3ª geração do CT.

FONTE: Araújo (2008).

Em abril de 1976 a firma AS&E introduziu o conceito de tomógrafo de quarta geração que consistia num tubo de raios X, com movimento de rotação dentro de um conjunto fixo de detectores (FIGURA 13). Esses tomógrafos, contudo, devido a problemas de tecnologia dos computadores e dos detectores, matemática de reconstrução, processamento dos sinais e tubos de raios X só puderam entrar efetivamente em uso por volta de 1981. Existem algumas vantagens dessa geração, a maior estabilidade dos detectores, a possibilidade de utilizar uma grande abertura do leque de radiação e a facilidade de eliminar os artefatos.

Com toda esta evolução, contudo, grandes volumes corporais (tórax e abdômen) só podiam ser examinados através de cortes individuais (tomogramas) e, dependendo do número de cortes, os pacientes permaneceram durante muito tempo na mesa de exame, ou seja, cerca de 30 a 45 minutos para um exame completo do tórax ou abdômen (antes e depois do contraste).

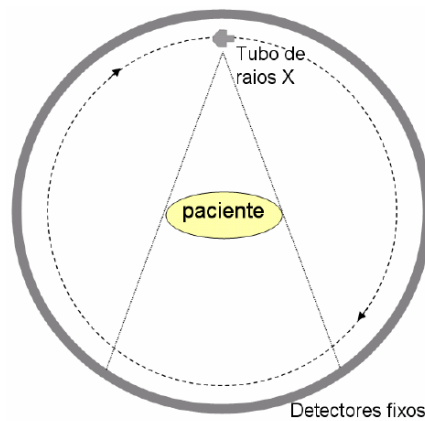


FIGURA 13 - Ilustração da geometria da 4ª geração do CT.
 FONTE: Araújo (2008).

Novas gerações de tomógrafos surgiram e desta vez, com surpreendente tecnologia que conjuga novos computadores, novos softwares, novos tubos de raios X e novos sistemas de aquisição de dados. Foram a quinta e a sexta gerações que culminaram com o sistema helicoidal (FIGURA 14). Com ele é possível a aquisição de dados de grandes volumes (até um metro de extensão corporal) em apenas 32 segundos para obtenção de milhares de cortes tomográficos.

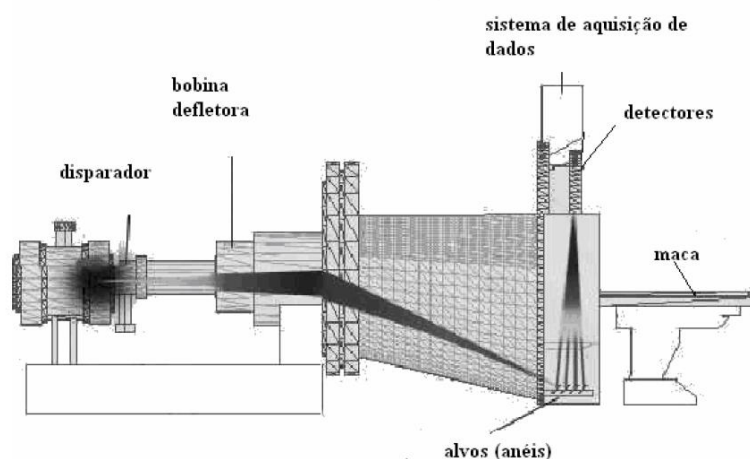


FIGURA 14 - Ilustração da geometria da 5ª geração do CT.
 FONTE: Tetzner (2008).

Em 1998 foi lançado o CT com tecnologia de multi- cortes, equipamento de quatro cortes, em 2001 de 16 cortes, em 2004 de 64 cortes (FIGURA 15). Em 2007, foi lançado um de 320 cortes e o primeiro de quatro dimensões, capaz de varrer até 16 cm do paciente com uma única rotação e leva 0,35 segundos aproximadamente.

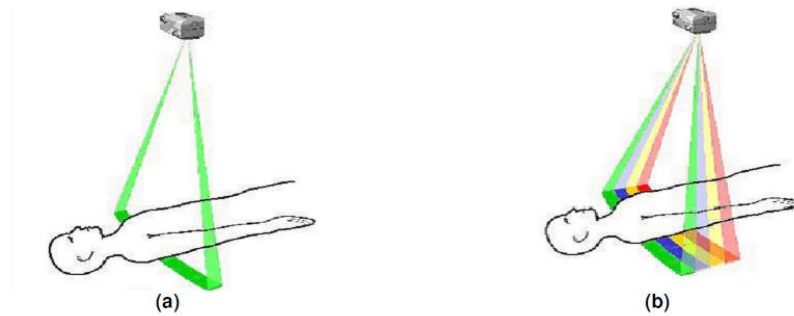


FIGURA 15 - Esquematisação (a) convencional; (b) multi-cortes.
FONTE: Araújo (2008).

A microtomografia computadorizada (micro-CT) surgiu na década de 80 pela necessidade de estudar estruturas menores. Nesta técnica o sistema tomográfico possui uma fonte de raios X com um foco da ordem de micrometros. A vantagem dessa técnica está na alta resolução espacial alcançada, permitindo maior clareza de imagem, não ocorrendo efeito de penumbra geométrica (LOPES *et al.*, 1997).

2.6.2 Raios X – Contexto Teórico

No final do século XIX os raios X foram descobertos por Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), físico da Universidade Wurtzburg, quando realizava experiências com raios catódicos.

Os raios catódicos eram produzidos num tubo parcialmente a vácuo onde era aplicada uma alta tensão. Röntgen estava estudando a condutividade dos gases em uma sala escura, com um tubo coberto com cartolina preta, para que não escapasse a luz. A certa distância do tubo havia uma folha de papel, usada como

tela, tratada com platinocianeto de bário. Os raios catódicos ao atravessarem o tubo parcialmente a vácuo e atingirem a tela emitiam fluorescência. Concluiu Röntgen que essa fluorescência era proveniente de um novo tipo de radiação, que denominou raios X. Os raios X se originavam na área da ampola de descarga onde os raios catódicos colidem com a parede de vidro.

Em 28 de dezembro de 1895, Röntgen entregou à Sociedade Física Médica de Würzburg, Alemanha, um relatório preliminar de sua descoberta, descrevendo as pesquisas 'secretas' que fizera nas sete semanas anteriores: os objetos tornavam-se transparentes diante dos raios X. As chapas fotográficas eram sensíveis aos raios X; não se podia ver qualquer reflexo ou refração dignos denota ao se desviá-los com um campo magnético.

Produção de Raios X

Os raios X são produzidos quando qualquer partícula eletricamente carregada, de suficiente energia cinética, é rapidamente desacelerada. Elétrons são normalmente usados, a radiação sendo produzida em um "tubo de raios X" o qual contém uma fonte de elétrons e dois eletrodos metálicos (FIGURA 16). A alta voltagem mantida entre os eletrodos (algumas dezenas de milhares de volts) rapidamente atrai os elétrons para o ânodo, ou alvo, no qual eles colidem a alta velocidade. Raios X são produzidos no ponto de impacto e irradiam em todas as direções.

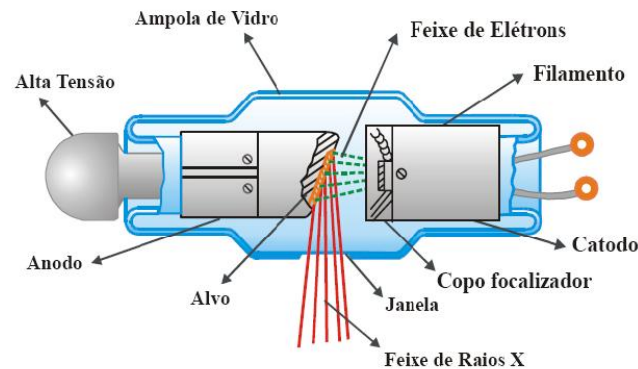


FIGURA 16 - Esquema da ampola de Raios X.

FONTE: Tauhata *et al.* (2003)

Qualquer elemento, se usado como alvo em um tubo de raios X e bombardeado com elétrons com energia suficientemente alta, emitirá uma linha característica do espectro. Estas mesmas linhas serão emitidas se o elemento for bombardeado com raios X com energia suficientemente alta (fluorescência).

Espectro de Emissão dos Raios X

O choque do feixe de elétrons com o ânodo (alvo) produz dois tipos de espectros de raios X: um espectro contínuo, que resulta da desaceleração do elétron durante a penetração no ânodo (efeito de *bremsstrahlung*), e outro, discreto, denominado de raios X característico do material do ânodo. O espectro de raios X resulta da superposição de um espectro contínuo e de uma série de linhas espectrais características do material do ânodo.

Interação dos Raios X com a Matéria

Por não possuir carga nem massa as radiações eletromagnéticas podem penetrar grandes espessuras de matérias sem interagir com seus átomos. Sua

probabilidade de interação depende da energia da radiação incidente, da propriedade do material alvo, ou seja, número atômico dos elementos e a densidade (FIGURA 17).

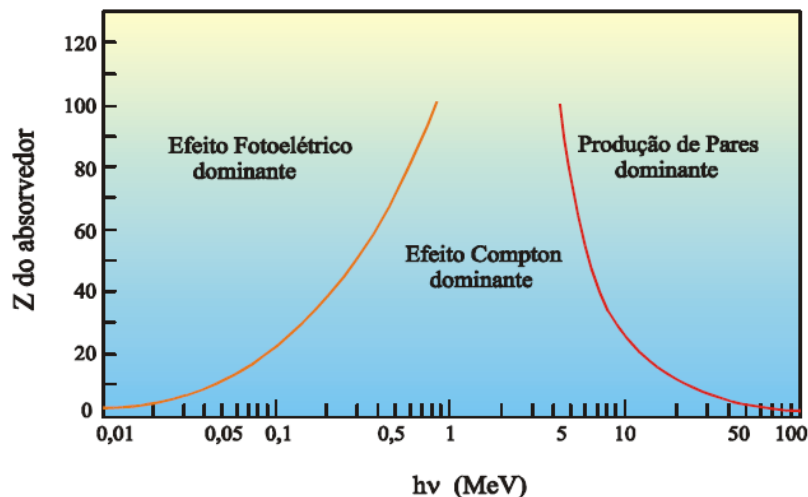


FIGURA 17 - Interação dos fótons com a matéria em função da energia do fóton e do número atômico do material.

FONTE: Tauhata *et al.*(2003).

Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é o fenômeno no qual elétrons são emitidos de uma superfície metálica quando incide nesta um feixe de luz, e os elétrons emitidos são chamados fotoelétrons. Este fenômeno foi descoberto por Hertz em 1887, e explicado pela teoria quântica de Einstein em 1905.

Einstein mostrou que a onda eletromagnética ao incidir num material interage com seus átomos de forma corpuscular. No efeito fotoelétrico o fóton ao colidir com o elétron, transmite toda sua energia e desaparece por completo. O elétron é ejetado do material, como mostra na FIGURA 18.

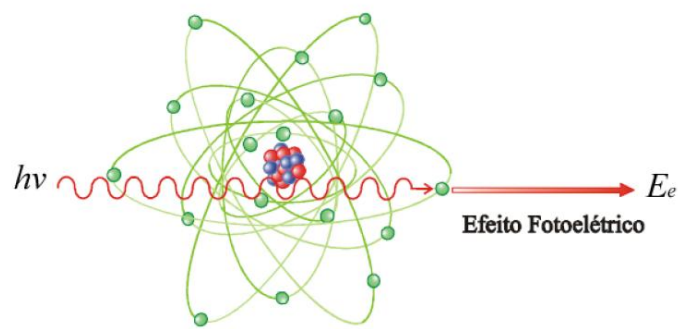


FIGURA 18 - Ilustração do Efeito Fotoelétrico.
 FONTE: Tauhata *et al.* (2003).

Para a ocorrência do efeito fotoelétrico a energia $h\nu$ do fóton deve ser maior ou igual à energia de ligação do elétron com o átomo do material alvo, e a interação é com os elétrons do átomo, não pode ocorrer elétrons livres. A energia cinética K do elétron ejetado depende da energia do fóton incidente e da energia de ligação do elétron.

$$K = h\nu - \omega$$

Onde:

K = energia cinética do elétron

h = constante de Planck

ν = frequência da radiação

ω = energia de ligação

O efeito fotoelétrico ocorre com maior probabilidade para fótons incidentes com energias mais baixas e para interação com elementos de alto número atômico (KNOLL, 2000).

O elétron ao ser ejetado cria uma vacância que será preenchida por um elétron de um nível mais energético. Ao ser emitido o fóton é, criada uma diferença de energia, que será igual à diferença entre a energia do nível inicial e do nível final, esse fenômeno é chamado de fluorescência.

Efeito Compton

Arthur Holly Compton, em 1923, realizou uma experiência em que incidia um feixe de raios X de comprimento de onda λ sobre um alvo de grafite e mediu a intensidade dos raios X espalhados em função do seu comprimento de onda para vários ângulos espalhados.

O Efeito Compton é caracterizado pelo espalhamento fótons por elétrons mais externos ao átomo. Segundo Eisberg & Resnick (1994) o elétron absorve a energia da onda eletromagnética e irradia novamente como radiação espalhada, arrancando um elétron do átomo (FIGURA 19).

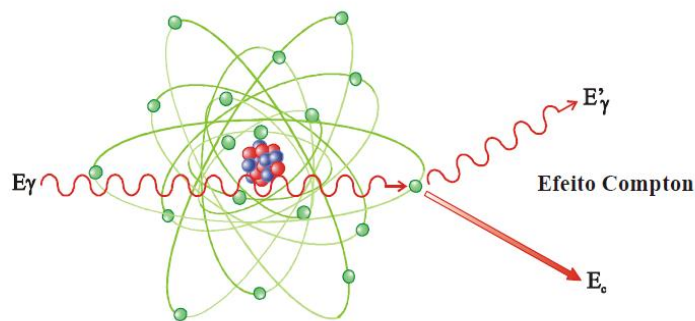


FIGURA 19 - Ilustração do Efeito Compton.

FONTE: Tauhata *et al.* (2003).

Onde:

E_γ = fóton de raios X incidente

E'_γ = fóton espalhado

E_e = elétrons após a colisão

Produção de Pares

A produção de pares só ocorre quando fótons de energia igual ou superior 1,02 MeV passam próximos aos núcleos de elevado número atômico. Nesse caso a radiação X interage com o núcleo e desaparece, dando origem a um elétron e um pósitron com energia cinética em diferente proporção. O pósitron após transmitir, por colisões, a sua energia cinética aos átomos do meio, volta a se combinar com um

elétron, dando origem a dois fótons, cada um com energia de 0,511 MeV (TAUHATA *et al.*, 2003)(FIGURA 20).

A formação de pares é predominante para energias elevadas e para elementos de grande número atômico.

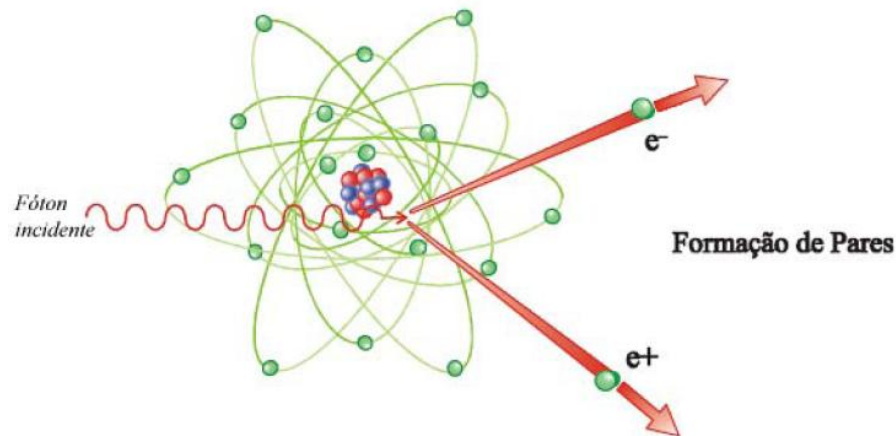


FIGURA 20 - Ilustração do Efeito de Formação de Pares.

FONTE: Tauhata *et al.* (2003).

Determinação do Coeficiente de Atenuação Linear

O coeficiente de atenuação linear, μ , é obtido através de medidas da transmissão dos raios X pelo objeto, é possível obter a distribuição espacial em todo o volume atravessado pelos raios X. Para cada tipo de substância obtêm um coeficiente de atenuação linear específico (FIGURA 21).

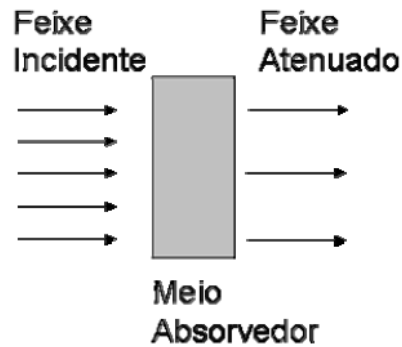


FIGURA 21 - Representação da atenuação, fótons incidentes em função da espessura de um meio absorvedor de coeficiente de atenuação.

FONTE: Tetzner (2008).

Quando um feixe de raios X incide em um determinado material de espessura, x , parte dessa radiação é absorvida e parte é espalhada e uma fração passa sem interagir com o material. Para tanto, é necessário conhecer a intensidade I do feixe de raios X que atravessa o corpo, e a intensidade I_0 , que não é atenuado pelo corpo.

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Onde:

x = espessura do material

μ = coeficiente de atenuação linear

I_0 = intensidade do feixe incidente

I = intensidade do feixe emergente

Formação da Imagem

A construção da imagem na tomografia computadorizada consiste na análise da atenuação sofrida por um feixe de radiação, o qual atravessa um determinado material. Ou seja, a partir dessa atenuação têm-se as medidas da integral na linha de distribuição da densidade da massa, através do caminho percorrido pelo feixe. Portanto, a reconstrução da imagem de acordo com a densidade só é possível através de vários feixes com diferentes orientações em relação ao volume (AIRD, 1988).

3 GEOLOGIA DA REGIÃO

Segundo Martin *et al.* (1997) a Lagoa Salgada é uma laguna alongada no meio de terraços arenosos holocênicos, formada durante o abaixamento do nível marinho. As lagoas da região foram estabelecidas na retaguarda de esporões arenosos construídos pela deriva litorânea que, ao se afastar da praia, acabou por isolar uma zona de antepraias que foi ocupada pelas lagunas. A Lagoa Salgada é hipersalina, e essa hipersalinidade tem propiciado condições especiais para sedimentação química carbonática (PATCHINEELAM & REBELO, 1984; SANTELLI, 1988) (FIGURA 3.1). Segundo Rodrigues *et al.* (1981) a lagoa sofreu uma transição de um ambiente marinho para lagunar, confirmado pela análise de microfauna de foraminíferos em testemunhos de sondagem. A idade da lagoa Salgada segundo Lemos (1996) está entre 3060 a 2930 anos A.P. e foi realizada com conchas coletadas nos sedimentos da seqüência marinha.

3.1 GEOLOGIA

O arcabouço geotectônico do Estado do Rio de Janeiro é constituído por três grandes domínios tectono-magmáticos relacionados ao embasamento pré-cambriano - Domínio Juiz de Fora/Paraíba do Sul; Domínio Serra do Mar; e Domínio Região dos Lagos, além das coberturas cenozóicas (FIGURA 22). Estes domínios constituem-se de ortognaisses, paragnaisses e metassedimentos variados (xistos, quartzitos, mármore etc) (CPRM, 2001).

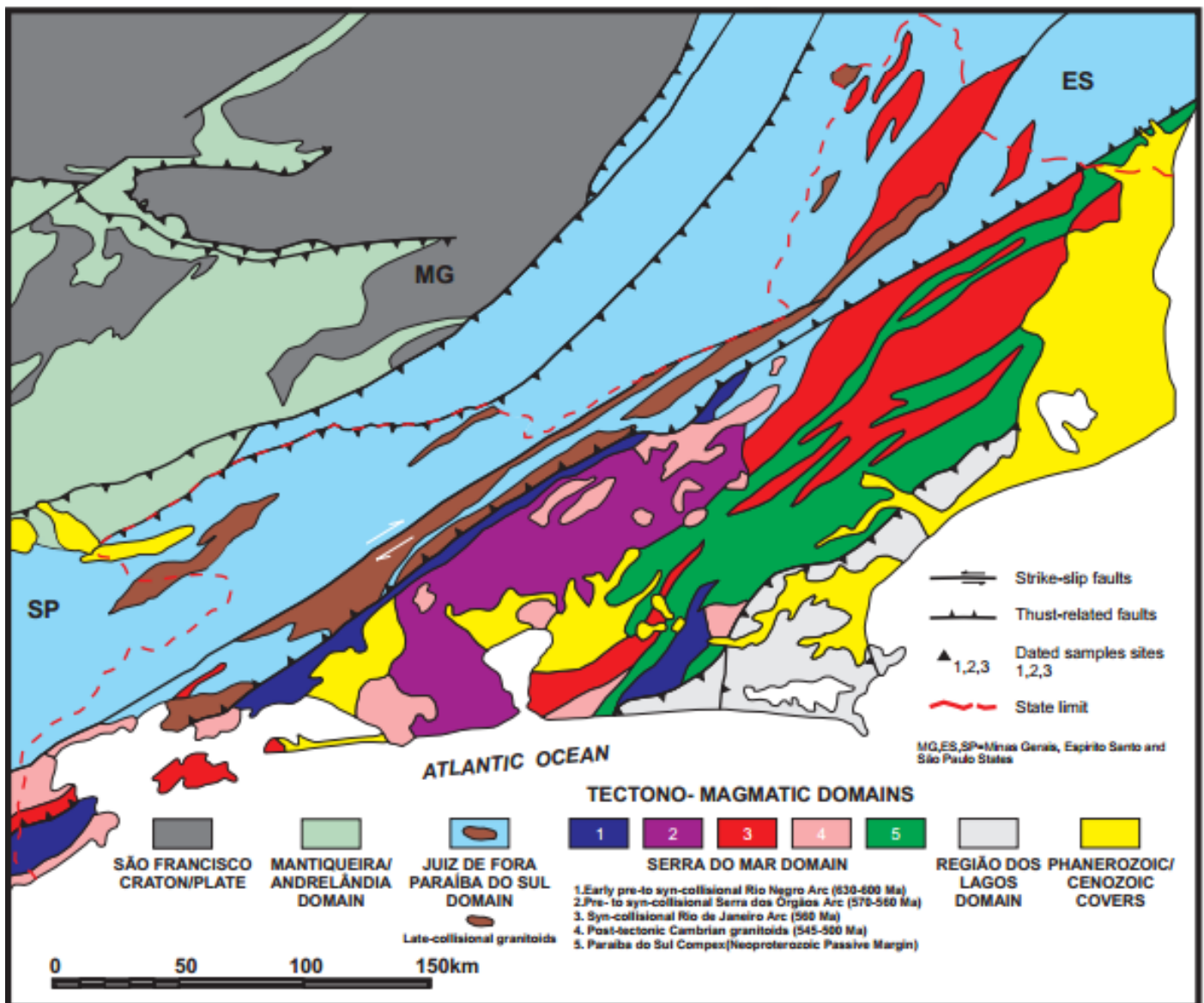


FIGURA 22 - Domínios tectono-magmáticos do Estado do Rio de Janeiro, potenciais áreas-fonte para os sedimentos do delta do rio Paraíba do Sul.

FONTE: CPRM (2001).

3.1.1 Domínio Juiz de Fora

Segundo CPRM (2001) este domínio se caracteriza por uma extensa faixa alongada de direção principal NE-SW, subparalela à zona de cisalhamento Paraíba do Sul, limitada, a oeste, pelas rochas do Domínio Mantiqueira/Andrelândia e, a leste, pelas rochas que compõem o Domínio Serra do Mar (FIGURA 23).

As rochas do Domínio Juiz de Fora/Paraíba do Sul afloram na região do município de Itaperuna, com um relevo colinoso alternado com áreas serranas, podendo alcançar até 1000 metros de altitude.

É constituído pelos gnaisses kinsigíticos, xistos, quartzitos e mármore do Complexo Paraíba do Sul, metamorfizados na fácies anfibolito e granulito, os quais encontram-se intercalados aos ortogranulitos e ortognaisses tonalíticos de idade paleoproterozóica do Complexo Juiz de Fora, além dos ortognaisses graníticos a granodioríticos da Suíte Quirino.

3.1.2 Domínio Serra do Mar

De acordo com CPRM (2001), este domínio ocorre na porção centro-oriental do estado do Rio de Janeiro (FIGURA 23), sendo constituído por diversos arcos magmáticos: arco Rio Negro (630 Ma); arco Serra dos Órgãos (570-560 Ma); e arco Rio de Janeiro (560 Ma).

Neste domínio, ocorre ainda a presença marcante de plútons pós-tectônicos de idade cambriana.

As rochas quem compõem o Domínio Serra do Mar afloram mais especificamente a oeste do município de Campos dos Goytacazes, em um contexto geomorfológico diferente da região de ocorrência das rochas do Domínio Região dos Lagos, com um relevo mais acidentado, podendo alcançar altitudes superiores a 500 m. Estas unidades englobam metassedimentos detríticos, pelitos grauvaqueanos, mármore, paragraulitos, rochas calcissilicáticas, fusões quartzofeldspáticas e mais raramente quartzitos.

3.1.3 Domínio Região dos Lagos

As rochas do Complexo Região dos Lagos e do Complexo Búzios afloram na porção sudoeste da planície costeira do rio Paraíba do Sul (FIGURA 23), a oeste

da região de Quissamã, sob a forma de colinas muito pouco dissecadas, com alguns morrotes alinhados e cotas topográficas de até 50 metros.

A unidade Complexo Região dos Lagos constituída por ortognaisses bandados/dobrados, de composição tonalítica a granítica, com abundantes paleodiques anfibolíticos deformados. Em alguns locais, são encontradas venulações graníticas, indicando que estas rochas foram parcialmente fundidas (CPRM, 2001).

Complexo Búzios caracteriza-se por rochas paragnáissicas, que englobam três associações litológicas distintas: metapelítica, anfibolítica e calcissilicática, sendo esta última constituída por intercalações das duas associações anteriores (metapelítica e anfibolítica), apresentando níveis de biotita-diopsídio gnaisse (CPRM, 2001).

3.2 COBERTURAS CENOZÓICAS

Na região costeira do estado do Rio de Janeiro (FIGURA 22 e FIGURA 23) ocorre uma série de ambientes de sedimentação quaternária, associados a sistemas deposicionais de origem continental e transicional/marinho. Sendo o lado continental formado por conjunto de rochas do embasamento de diferentes litologias e idades. O lado oceânico com uma ampla plataforma continental constituída por sedimentação marinha quaternária. As bacias sedimentares cenozóicas correspondem a rochas sedimentares, pouco litificadas, de idade eocenozóica, e sedimentos inconsolidados, neocenozóicos.

O depósito sedimentar quaternário onde se desenvolve a planície costeira é guiado pelas direções estruturais do embasamento, o qual influencia na formação das baías e na disposição dos remanescentes rochosos interiores e antigas baías que passaram a receber sedimentos provenientes das terras altas.

A planície Quaternária do rio Paraíba do Sul é limitada pelos terraços Holocênico e Pleistocênicos, sendo caracterizada por feições costeiras marcantes do processo de evolução do delta, a saber, cordões arenosos compostos por cristas e cavas distribuídos por feixes com divergências ou discordâncias em sua orientação

azimutal. Esses cordões são paleopraias que sofreram no passado geológico ação de agentes que provocaram outros episódios erosivos, muito possivelmente semelhantes ao atual, durante a formação da planície deltaica, por ação marinha (MARTIN *et al.*, 1984).

Sob o ponto de vista geomorfológico a Planície Quaternária é caracterizada por uma superfície plana de no máximo 20 m de altitude, com uma leve inclinação em direção ao mar, com presença de lagoas, lagunas, áreas pantanosas e cordões arenosos ao sul do Cabo de São Tomé e na desembocadura do rio Paraíba do Sul. Entre os municípios de Campos e São Tomé a planície quaternária caracteriza-se por gradientes muito suaves, com rede de drenagem constituída por canais meandantes e divagantes (CPRM, 2001).

As Bacias Sedimentares Cenozóicas podem ser subdivididas nas seguintes unidades morfoesculturais: Tabuleiros de Bacias Sedimentares, Planícies Fluviomarinhas (Baixadas); Planícies Costeiras (FIGURA 23).

Durante o Quaternário, segundo Martin *et al.* (1986), os sedimentos inconsolidados das baixadas e planícies costeiras se formaram através dos ciclos transgressivos e regressivos da linha da costa. A atual linha de costa registra um “afogamento” generalizado do relevo, que ocorreu a partir do ultimo máximo transgressivo, que foi observado nas atuais enseadas, baías e lagunas e nas colinas e morros isolados nos recôncavos das baixadas.

As unidades morfoesculturais foram formadas a partir da abertura do Atlântico e consolidadas ao longo do Terciário, e ainda continuam sendo modificadas pela erosão e sedimentação, ao longo do tempo e espaço. Esses eventos resultaram na formação atual da morfologia.

As coberturas cenozóicas são divididas em depósitos de idades distintas, que serão apresentados abaixo:

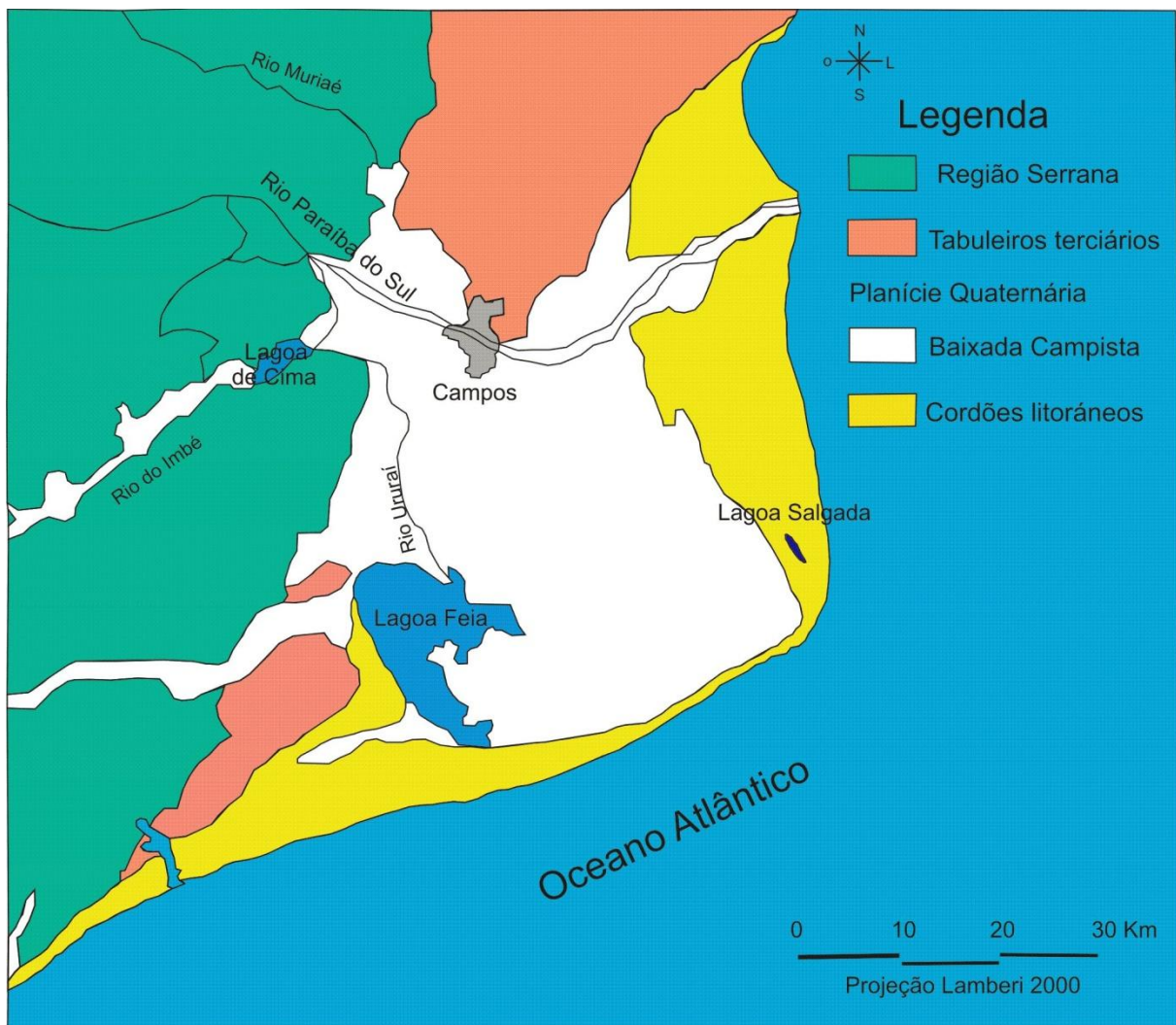


FIGURA 23 - Unidades geomorfológicas.

FONTE: Modificado CPRM (2001).

3.2.1 Depósitos Pleistocênicos – Depósitos Praias Marinhos e/ou Lagunares

Os Depósitos Pleistocênicos são genericamente relacionados ao último evento transgressivo marinho ocorrido por volta de 123.000 anos atrás. As fácies arenosas que o constituem são interpretadas como sendo de origem praial marinha e/ou lagunar, recobertas por áreas eólicas.

A região ao sul da planície costeira do rio Paraíba do Sul, apresenta cicatrizes características da antiga drenagem que estava ativa quando o nível de base era inferior ao atual (MARTIN & SUGUIO, 1978).

Os depósitos pleistocênicos reduzem-se a uma faixa estreita na margem oceânica, entre Rio das Ostras e Barra de São João, e encontram-se alguns vestígios rumo ao interior.

3.2.2 Depósitos Holocênicos

No Holoceno a região costeira desenvolveu-se apoiada em partes, nos depósitos e nas litologias da Formação Barreiras. Esses depósitos se dão pela transgressão do nível do mar e posteriormente pela regressão, possibilitando a formação de uma barreira arenosa próxima à antiga planície pleistocênica. Com a ingressão do mar através dos vales foi possível restabelecer algumas lagunas presentes na costa e posteriormente a progradação da barreira, resultando a evolução de um ambiente sedimentar. As feições morfológicas hoje observadas são resultados de pequenas transgressões e regressões ocorridas nos últimos cinco mil anos.

O assoreamento da área produzido pela chegada de sedimentos fluviais, somado à remobilização destes pelos agentes da dinâmica costeira, ondas e correntes litorâneas atuantes no interior dos corpos lagunares, proporcionaram a sua segmentação. A progradação de margens pantanosas e o crescimento de praias e pontais arenosos são responsáveis pela sua configuração atual (MARTIN *et al.*, 1984).

3.3 EVOLUÇÃO DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO PARAÍBA DO SUL

O complexo deltaico do rio Paraíba do Sul vem sendo estudado desde 1950 por Bacoccoli (1971), Bastos & Silva (1996), Martin *et al.* (1984 a,b), Dominguez *et al.* (1987), Martin *et al.* (1986), Dominguez (1990), Dias *et al.* (1984a,b), Silva (1987), Gonçalves (2005), Gonçalves & Silva (2005) e Silva (2002). Esses pesquisadores dedicaram-se a compreensão da evolução dessa planície costeira, e construíram a base de conhecimentos, tais como as flutuações do nível do mar durante o quaternário, atividades tectônicas, e a dinâmica fluvial da

desembocadura do rio, através de estudos sobre o arredondamento das areias, discordâncias nos cordões arenosos holocênicos e análises de proveniência e distribuição de minerais pesados.

Lamego (1955, apud TOMAZ, 2005) foi quem iniciou as hipóteses da evolução do rio Paraíba do Sul que reconheceu quatro fases de progradação deltaica, cada fase refere-se a um período de flutuação do nível do mar (transgressão e regressão).

Segundo Silva (1987) a evolução para a região da Lagoa Feia é caracterizada por uma complexa superposição de eventos transgressivos e regressivos do nível relativo do mar, onde observou o desenvolvimento de seqüências arenosas progradantes (“cristas de praia”) e retrogradantes (“ilhas-barreira e cordões litorâneos”), superpostas e sobrepostas a sedimentos lacustres e sedimentos fluviais. Esses eventos são resultados de oscilações eustáticas, atividade tectônica, direção da corrente de deriva litorânea e variações climáticas.

Dominguez (1990) propõe um modelo que considera as variações do nível do mar, direção da corrente de deriva litorânea, regime de ondas atuantes (NE e S-SE), desempenhando um importante papel no transporte litorâneo de sedimentos para as planícies consideradas.

Tomaz (2005) identificou uma feição de lobo turbidítico recente que constitui o principal receptor de sedimentos desta porção da bacia de Campos.

A região analisada foi submetida a sucessivos eventos tectonossedimentares que propiciou as características da formação geomorfológica atual.

4 ESTROMATÓLITO E POROSIDADE

Segundo Spadini e Marçal (2005) o grande interesse em carbonatos justifica-se pelo fato de que cerca de 50% do petróleo no mundo é produzido nesse tipo de rochas. Portanto, rochas carbonáticas constituem os reservatórios dos maiores campos petrolíferos do mundo, abrangendo uma variada gama de fácies deposicionais e um complexo meio poroso.

As rochas-reservatório provêm de bacias sedimentares, originadas pela deposição de detritos de outras rochas (mágmatícas e metamórficas), geralmente transportados por agentes, tais como, água e ar. Elas são classificadas, em geral, como rochas brandas e porosas.

O meio poroso no qual se acumula o petróleo ou o gás é denominado rocha reservatório ou armazenadora. Em geral o óleo ou gás ficam aprisionados nos espaços vazios e estão localizados abaixo de uma camada impermeável, que são as rochas capeadoras ou selantes. Portanto, a caracterização do comportamento deste tipo de rocha é de grande interesse para a indústria do petróleo (SUGUIO, 1982).

O interesse da geologia exploratória de hidrocarbonetos nas rochas estromatolíticas é o fato do carbonato microbiano ser formado a partir de cianobactérias no processo de construção dos estromatólitos, podendo ocorrer percolação de óleo nas suas porosidades. Existe uma intensa interação microbiana nos processos de sedimentação terrígena, evaporítica e carbonática.

Uma vez que elevadas concentrações de hidrocarbonetos encontram-se nos depósitos sedimentares, os estudos relacionados ao sistema poroso de rochas carbonáticas são de grande relevância. A compreensão da porosidade em estromatólitos recente tem extrema importância, pois o êxito da exploração está fortemente ligado a um amplo conhecimento das rochas carbonáticas e seu arcabouço poroso.

4.1 ESTROMATÓLITOS

Segundo França *et al.* (2006) a história da vida na Terra teve dois momentos iniciais importantes, o surgimento da vida com os organismos procariontes (por volta de três bilhões de anos) e a explosão da vida multicelular (a mais de 600 milhões de anos). Os primeiros organismos procarióticos, algumas bactérias estão fossilizadas, outras deixaram registros na forma de estromatólitos colunares (FIGURA 24).



FIGURA 24 - Estromatólitos colunares (Grupo Açungui).

Segundo Guerrero (1998), os estromatólitos foram os primeiros ecossistemas microbianos e representam uma das mais antigas evidências de atividade orgânica da Terra. Durante o Pré-Cambriano e um pouco menos, no início do Paleozóico, esses ecossistemas microbiais constituíram impressionantes estruturas recifal. As cianobactérias que participavam de sua construção foram possivelmente responsáveis pela geração de parte do oxigênio da antiga atmosfera terrestre, sendo a forma de vida dominante por mais de 2,0 bilhões de anos. No

Cambriano ocorreu um aumento de oxigênio que foi importante para aumento de vida, trazendo novos organismos, como os gastrópodes e equinóides, iniciando um processo de diminuição das cianobacterias. No Ordoviciano Médio ocorreu um declínio dos estromatólitos, pelo aumento desses novos organismos (gastrópodes e equinóides) que gerou competição do espaço na superfície do ambiente (STEARN & CARROLL, 1989). Atualmente são observados em lagos salinos alcalinos, porém ocorrem também em lagos menos salinos de regiões frias (DEAN & FOUCH, 1983).

O termo estromatólito, do grego *strôma*, "o que cobre" ou "tapete", e *líthos*, pedra, surgiu quando foram encontradas rochas do Triássico no norte da Alemanha, (Buntsandstein) para caracterizar camadas calcárias construídas por estruturas finas e laminadas e um pouco planas (KALKOWSKY, 1908).

Uma das definições mais aceitas atualmente caracteriza os estromatólitos como estruturas biossedimentares litificadas, produzidas pelo aprisionamento, retenção e/ou precipitação de sedimentos (carbonatos), resultantes do crescimento e da atividade metabólicas de microorganismos, principalmente cianofíceas (algas verdes-azuis) (WALTER, 1976). Podem também originar, os estromatólitos, diversos microorganismos secretores de mucilagem, associados em comunidades construtoras de "tapetes" orgânicos, principalmente procariotas fotoautótrofos filamentosos, e são conhecidas desde o Arqueano até o Holoceno. São estruturas que ocorrem em regiões marinhas, hipersalinas e ambientes lacustres, com águas claras e rápidas (SABATER *et al.* 2000).

Existem duas maneiras nas quais as cianobactérias constroem estromatólitos. Uma está relacionada com secreção das células, que são mucos que prendem sedimentos finos, agregando esses pequenos grãos de carbonato de cálcio precipitados na água. As cianobactérias são fotossintéticas e capazes de crescerem em busca de luz solar (MCNAMARA, 2005). A outra maneira que geralmente ocorre em ambientes lacustres está relacionada com a precipitação de carbonatos diretamente pelas cianobactérias, com pouco acúmulo de sedimentos (MCNAMARA, 2005).

Embora fossem abundantes nos oceanos do Pré-Cambriano, estromatólitos são raros nos oceanos modernos. Ocorrem, entretanto, em grande quantidade em Shark Bay, Austrália, associados a lagunas hipersalinas (FIGURA 25). Nesta região ocorrem tanto nas zonas intermaré como inframaré, sendo a sua

geometria muito afetada pela energia do ambiente. Em áreas protegidas as estruturas são alongadas e amplas, porém nas regiões inframaré os pilares alcançam maiores dimensões. Em direção às zonas mais rasas, perdem gradualmente o seu relevo, de tal forma que na zona intermaré superior predominam os tapetes algais estratiformes (JAMES, 1983).



FIGURA 25 - Estromatólitos colunares de Shark Bay, Austrália.

FOTO: Nilo Matsuda.

No Brasil tem-se um exemplo de crescimento de estromatólitos em ambiente não marinho, que é representado pela lagoa Salgada, no litoral Norte do estado do Rio de Janeiro. Nesta área, as estruturas estromatolíticas não chegam a atingir grandes dimensões verticais (FIGURA 26). Este fato pode estar relacionado ao gradual recuo das margens da lagoa, causando a exposição das estruturas recém-construídas e dos tapetes microbiais.

Segundo Lemos (1996) durante a formação dos estromatólitos da Lagoa Salgada, ocorreram mudanças morfológicas devido às variações em diversos fatores mecânicos, ambientais e biológicos. O controle biológico do microambiente afeta o trapeamento e os sedimentos que estão abaixo da superfície da esteira tanto de forma direta como indireta. Podem também alterar as condições para precipitação ou dissolução dos minerais. Fatores mecânicos como movimentação da água e a dissecação também são importantes para a formação do estromatólito.

Essas variações morfológicas entre as camadas podem ser causadas pelo aumento da lamina d'água da lagoa, que propiciou condições mais calmas para o desenvolvimento dos estromatólitos.

Um dos principais problemas relacionados ao estudo dos estromatólitos está em sua classificação e nomenclatura. Deve-se levar em conta que sua descrição envolve a caracterização de um ecossistema constituído geralmente por mais de um organismo, e não a descrição isolada de um indivíduo. Vários termos foram também propostos para especificar os estromatólitos. O termo trombólito designa estromatólitos criptoalgais que não apresentam um arcabouço laminado distinto, mas de aspecto "coagulado" (AIKTEN, 1967). A denominação mais genérica de microbialitos foi proposta para referir-se a qualquer depósito organo-sedimentar formado pela interação entre comunidades microbiais bentônicas e sedimentos químicos ou detríticos, englobando neste caso tanto os estromatólitos quanto os trombólitos, oncólitos e tapetes algais (BURNE & MOORE, 1987). O termo estromatoporóide é usado para estruturas semelhantes a estromatólitos, porém de origem incerta ou duvidosa.



FIGURA 26 - (a) estromatólito; (b) Lagoa Salgada.

FOTO: Nilo Matsuda.

Segundo Srivastava e Rocha (2002) na Lagoa Salgada existem quatro tipos de estruturas microbianas: esteiras microbianas, estromatólitos colunares, oncólitos e trombólitos.

As esteiras microbianas são estruturas gelatinosas, escuras, compostas de uma sucessão de lamina escuras (rica em matéria orgânica) e cinza, carbonática, estratiforme a crenuladas (SRIVASTAVA & ROCHA, 2002).

Estromatólitos colunares são um tipo de estruturas biossedimentares carbonáticas, dômicas a subesféricos e apresentam colunas discretas que se unem

lateralmente em lamina irregulares. Sua superfície externa é altamente cimentada e seu interior friável, com alta porosidade e preenchido por microgastropodes, matéria orgânica, tubos de vermes, bioclotos de bivalves e material terrígenos. Os estromatólitos colunares que tem tamanho superior a 5,0 cm possuem uma terminação cônica na superfície (SRIVASTAVA & ROCHA, 2002) (FIGURA 27).

Os oncólitos pequenas estruturas microbianas com laminação concêntrica, ainda em fase de crescimento, são encontrados na borda da lagoa (Srivastava, 1999).

Trombólitos são tipos de estruturas microbianas semelhantes aos estromatólitos colunares e colunares-estratiformes, formando pequenas biohermas dômicas. Mas a grande diferença de trombólitos do estromatólitos reside no fato de que a laminação interna é geralmente difusa devido às atividades parasíticas de microgastrópodos, vermes, ostracóidos e de outros organismos que destroem as estruturas internas, deixando uma feição grumelosa (SRIVASTAVA & ROCHA, 2002) (FIGURA 27).

Os estromatólitos encontrados na Lagoa Salgada foram estudados por Silva e Silva (2002) o qual foi executado a datação com C^{14} e os resultados apontou idade de 2500 anos A.P.

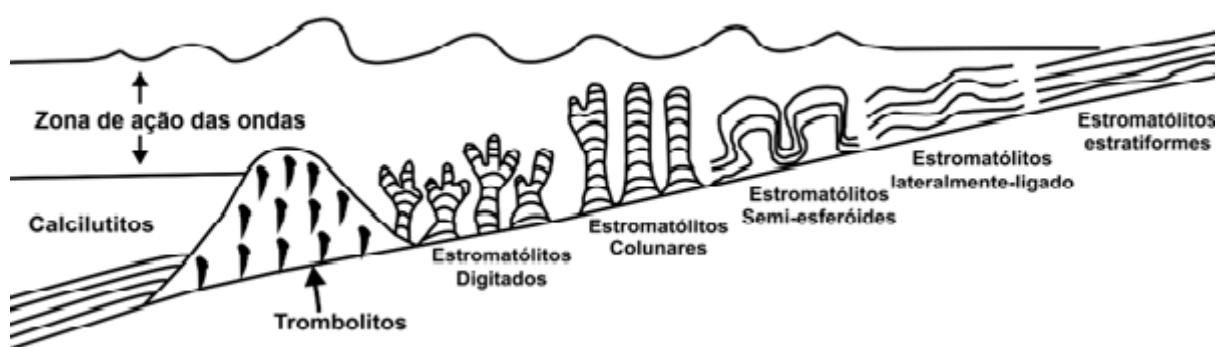


FIGURA 27 – Diferentes estruturas estromatolíticas (modificado Grotzinger, 1989).

4.2. POROSIDADE

A porosidade é uma propriedade física da rocha extremamente importante, pois ela mede a capacidade de armazenamento de fluidos (por exemplo: água, ar, gás ou petróleo).

Os poros de uma rocha, em geral, são conectados. Porém, devido à cimentação ou a processos de sedimentação, alguns estão totalmente isolados. Portanto têm-se dois tipos de porosidade em rochas reservatório: porosidade absoluta e porosidade efetiva.

4.2.1. Porosidade absoluta ou total (ϕ_t)

Porosidade absoluta é a razão entre o volume de espaços vazios e o volume total de rocha. O volume de espaço vazio (poros, vugs, canais, fissuras) pode ou não estar conectado. A equação que expressa porosidade absoluta é a seguinte:

$$\phi_t = \frac{V_v}{V_t}$$

Sendo:

ϕ_t = Porosidade absoluta ou total.

V_v = Volume de espaços vazios.

V_t = Volume total.

O uso da porosidade absoluta na Geologia tem aplicação no estudo de reservatórios apenas para cálculo de reservas. A porosidade absoluta inclui os poros conectados e não conectados. Os poros que não possuem conectividade ficam impossibilitados de que seus fluidos migrem, ou seja, ficam isolados não sendo interessante para exploração (SUGUIO, 1973; BONET & GABRIELLI, 1991).

A porosidade total de uma rocha é uma junção de diversos tipos de poros primários e secundários (CHOQUETTE & PRAY, 1970), que apresentam diferentes permeabilidades para o mesmo valor de porosidade (LÚCIA, 1999; MELIM *et al.*, 2001).

4.2.2. Porosidade efetiva (ϕ_e)

A porosidade efetiva é a razão entre o volume de espaços vazios conectados e o volume total de rocha. Essa porosidade representa os poros que estão preenchidos por fluidos que podem migrar pelo sistema poroso (BONET & GABRIELLI, 1991). A fórmula abaixo representa a porosidade efetiva:

$$\phi_e = \frac{V_c}{V_t}$$

Sendo:

ϕ_e = Porosidade efetiva;

V_c = Volume de poros conectados;

V_t = Volume total.

Para o estudo de reservatório a porosidade efetiva é a de maior relevância, pois representa quantitativamente os poros acessíveis, ou seja, o volume de fluido que poderá ser extraído.

Calcários que são altamente cimentados, normalmente apresentam grande diferença entre a porosidade total e efetiva. Já rochas com matérias granulares, pobre a moderadamente cimentada, apresentam porosidade efetiva e total aproximadas (BONET & GABRIELLI, 1991).

4.2.3. Classificação de Porosidade

A classificação utilizada neste trabalho para o estudo de porosidade baseia-se na proposta de Choquette e Pray (1970). É um sistema de caráter descritivo e genético, o qual abrange a combinação de termos separados em quatro categorias: tipos básicos de porosidade; modificadores genéticos, tempo de formação, modificadores de abundância. Essas categorias são detalhadas a seguir:

Tipos básicos de porosidade: com implicação sobre o tipo de porosidade e o local de formação no arcabouço da rocha (FIGURA 28 e FIGURA 29). As descrições dos tipos de porosidade encontradas em rochas carbonáticas expressas pelo modelo de Choquette e Pray (1970):

- De fábrica seletiva:
 - ✓ *Interpartícula.*
 - ✓ *Intrapartícula.*
 - ✓ *Intercristalino.*
 - ✓ *Móldica.*
 - ✓ *Fenestral.*
 - ✓ *Shelter.*
 - ✓ *Framework*
- De fábrica não seletiva:
 - ✓ *Fratura.*
 - ✓ *Canal.*
 - ✓ *Vug.*
 - ✓ *Caverna.*
- De fábrica seletiva e não seletiva:
 - ✓ *Brecha.*
 - ✓ *Boring.*
 - ✓ *Borrow.*
 - ✓ *Shrinkage.*

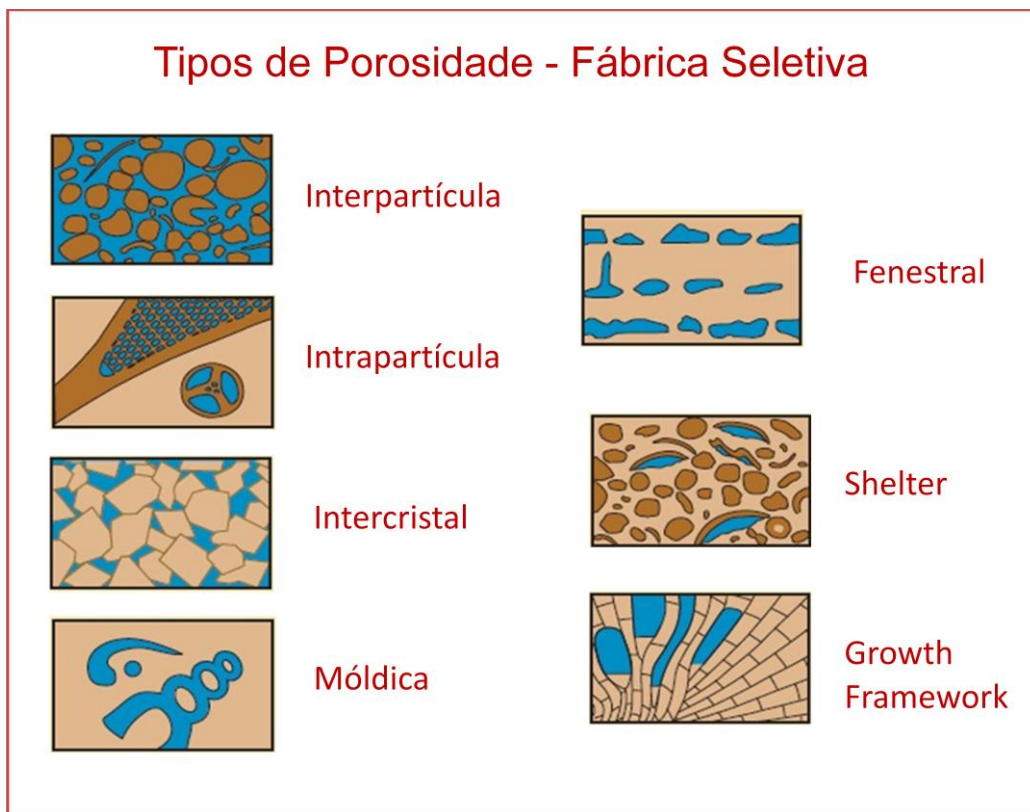


FIGURA 28 - Classificação de porosidade.
FONTE: Adaptado Choquette e Pray (1970).



FIGURA 29 - Classificação de porosidade.
FONTE: Adaptado Choquette e Pray (1970).

Modificadores genéticos:

- Processos envolvidos:
 - ✓ Cimentação
 - ✓ Sedimentação interna.
 - ✓ Dissolução.
 - ✓ Estágio de evolução da porosidade.
- Tempo de formação:
 - ✓ Primário (pré-deposicional ou deposicional).
 - ✓ Secundário (eogenético, mesogenético ou telogenético).

Para avaliar a porosidade primária e secundária das rochas sedimentares é de fundamental importância a investigação da diagênese, que são mudanças físicas, químicas e biológicas que transformam um sedimento em rocha sedimentar e alteram suas propriedades, após terem sido formadas. A diagênese usualmente não destrói as estruturas das rochas, mas podem modificar radicalmente a textura interna e a composição mineralógica.

Porosidade primária

Porosidade primária é dita porosidade original, criada antes de sofrer a diagênese. É desenvolvida durante o estágio pré-deposicional (por exemplo: poros intragranulares em foraminíferos, corais ou ooides), e durante a fase de deposição (porosidade deposicional) (BONET & GABRIELLI, 1991).

Os fatores que influenciam na formação da porosidade primária são: tamanho dos grãos, empacotamento, seleção, angularidade, compactação e grau de cimentação.

Porosidade secundária

Porosidade secundária é resultante de agentes geológicos após o processo de formação da rocha. Esses processos podem ou não contribuir ao aumento de porosidade.

Os processos de geração de porosidade secundária são dissolução, dolomitização, fraturamento e rupturas (FLUGEL, 2010).

Porosidade secundária é formada durante a diagênese em qualquer momento após a deposição. As definições de estágios diagenéticos criadas por Choquette e Pray (1970) foram estendidas para arenitos por Schmidt e McDonald (1979). De acordo com as definições propostas, a diagênese é dividida em três estágios (FLUGEL, 2010):

a) *eodiagênese*: atuante após a deposição e normalmente a pequena profundidade, diretamente influenciada pelo ambiente deposicional e/ou pela circulação de água superficial (marinha, meteórica), e por baixas pressões e temperaturas. Nesta zona a química da água intersticial é predominantemente controlada pelo ambiente sedimentar, como, por exemplo, água meteórica em ambiente continental e água de mistura marinha/meteórica em ambiente costeiro.

b) *mesodiagênese*: atuante após o “soterramento efetivo”, ou seja, subsequente ao efetivo isolamento da superfície, sob influência de fluidos diagenéticos intersticiais modificados pelas reações com os minerais e sob influência de pressões e temperaturas crescentes até a passagem gradual ao metamorfismo, a cerca de 200°C.

c) *telodiagênese*: provocada pela re-exposição de rochas que já estiveram soterradas às condições superficiais por soerguimento e erosão, ou por infiltração de águas meteóricas

Modificadores Geométricos:

- Tamanhos dos poros:
 - ✓ Megaporo: poros maiores que 2,0 mm.
 - ✓ Mesoporo: poros entre 2,0 mm a 60 µm.
 - ✓ Microporo: poros menores que 60 µm.
- Forma dos poros: a forma dos poros é altamente variável e, geralmente, muito irregular, no entanto, é possível aproxima-se de formas regulares. Entre estes geralmente considerado três formas extremas, de acordo com a sua relação dimensões: A, B e C, e as seguintes categorias:

- ✓ Equidimensionais: se $A=B=C$
- ✓ Cilíndrica: se $A>B=C$
- ✓ Planar: $A= B> C$

Modificadores de Abundância: estabelece o percentual do espaço poroso gerado, a proporção entre o tipo de porosidade ou a combinação de ambos.

5 ESTROMATÓLITO DA LAGOA SALGADA

Analisou-se o estromatólito coletado na Lagoa Salgada, a peça coletada media aproximadamente 20 cm de altura e 10 cm de base, sendo seu exterior fortemente litificado e o interior é friável. Observou-se uma lama, que em determinados locais, está preenchendo a porosidade interna sendo formada por matéria orgânica rica em microgastrópodes. Observou-se ainda uma variação das estruturas internas entre a base e o topo do estromatólito, que segundo Lemos (1996) está diretamente associado às mudanças das condições ambientais.

A análise do estromatólito possibilitou uma subdivisão em três camadas bem distintas, que foram estudas detalhadamente, por meio de análises tomográficas, microtomográficas, petrográfica, mineralógica em cada uma das camadas identificadas. Essas camadas são denominadas, nesse texto, como C1 (camada superior), C2 (camada intermediaria) e C3 (camada inferior) (FIGURA 30).

Os estudos, realizados de forma detalhada, das estruturas do estromatólito possibilitaram visualizar a possibilidade de subdividir as três camadas identificadas. Assim, a camada intermediaria (C2) foi dividida em duas subcamadas C2a e C2b, e a camada inferior (C3) em C3a e C3b (FIGURA 30). Cada uma dessas camadas foi descrita e estudada separadamente e os resultados obtidos foram integrados.

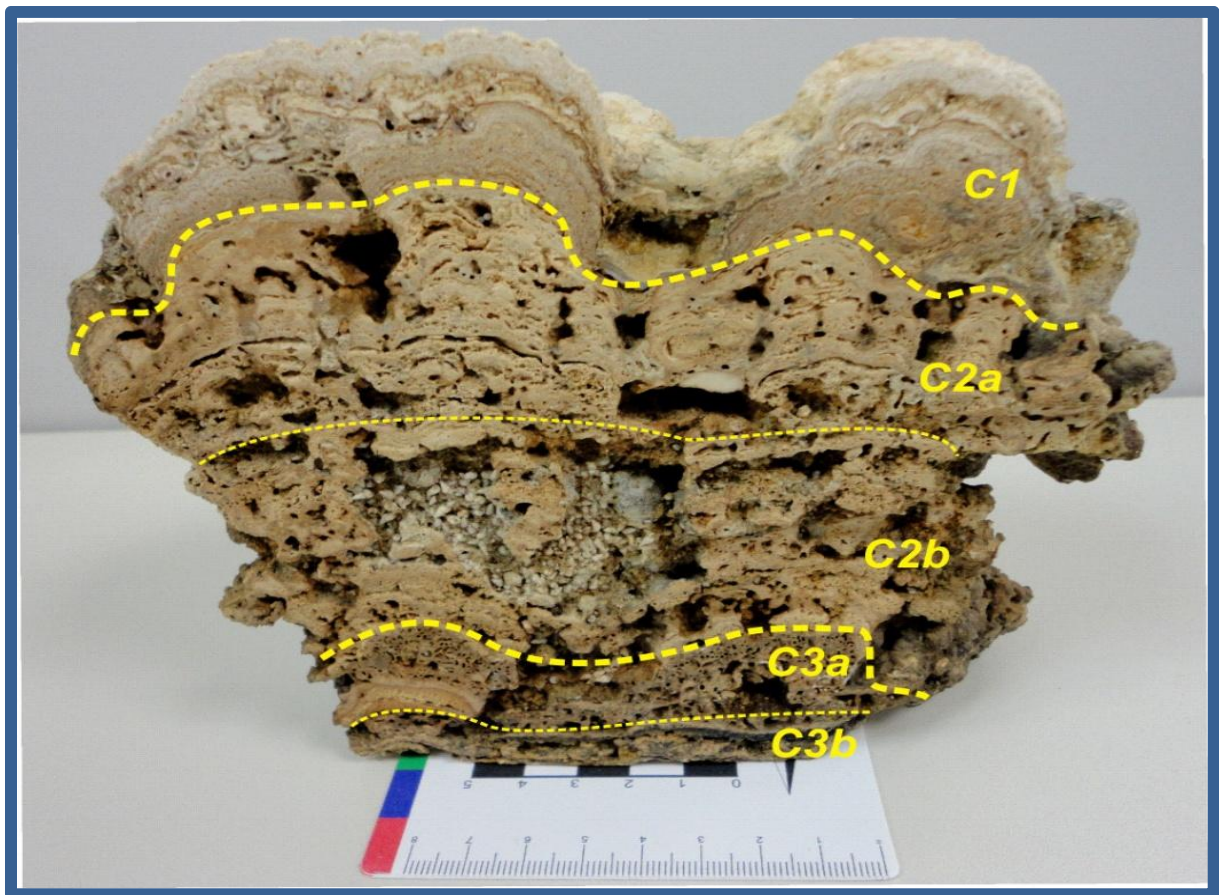


FIGURA 30 - Estromatólito dividido em camadas.

Realizou-se a binarização da imagem do estromatólito (poros em preto e rocha em branco), que permitiu visualizar seu perfil litológico (FIGURA 31). Na camada C1 percebe-se menor porosidade, estrutura maciça e laminada. Na subcamada C2a tem-se uma laminação e menor quantidade de poros. Já na subcamada C2b tem grande presença de gastrópode e poros do tipo caverna. Em C3a encontram-se poros arredondados gerados por bioturbação. Na camada C3b observou-se uma estrutura laminada e porosidade seguindo essa laminação.

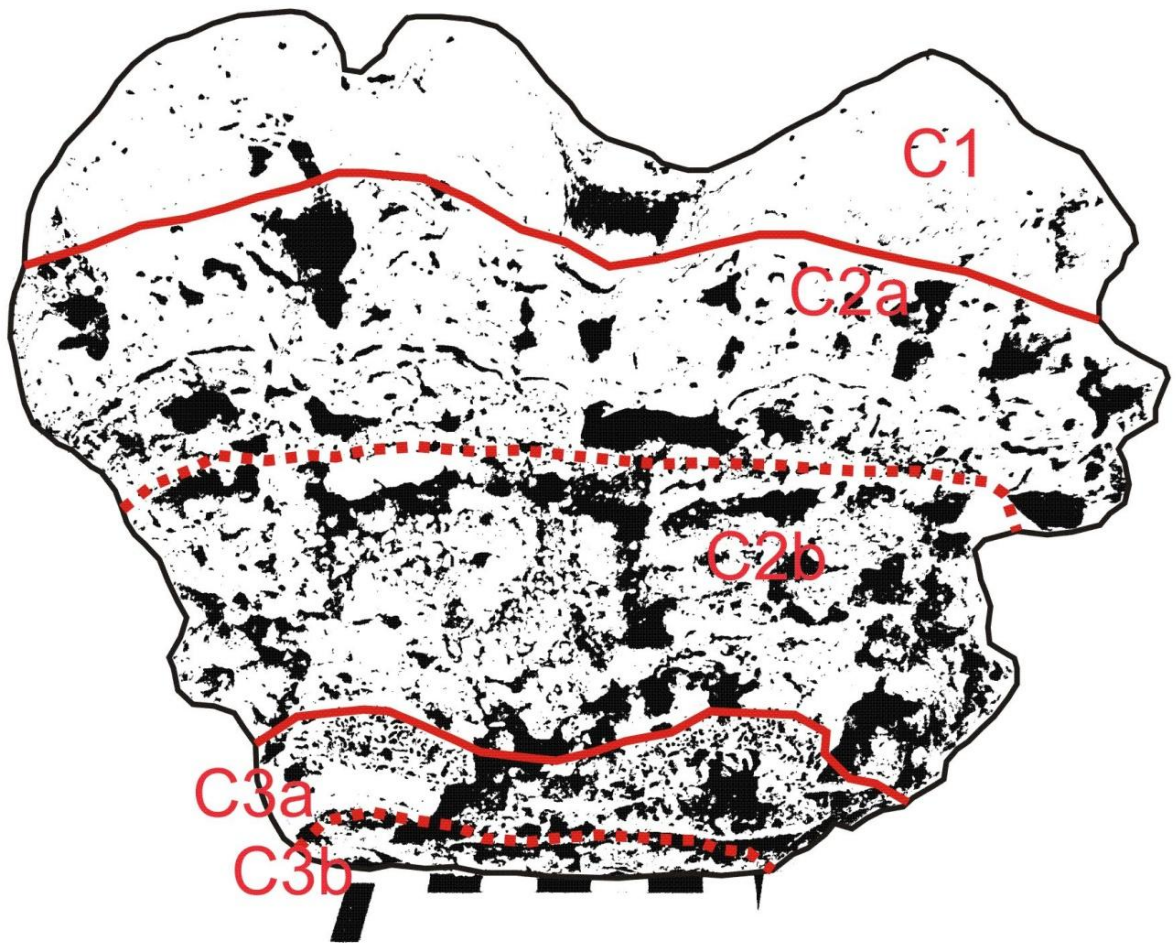


FIGURA 31 – Imagem binarizada do estromatólito.

O estromatólito (FIGURA 32) foi submetido à uma análise tomográfica, para se obter a quantificação total de porosidade de todas as 131 seções tomográficas analisadas. O equipamento utilizado foi o tomógrafo médico Bright Speed, que tem resolução de 500 μm , o que não permitiu uma imagem com boa qualidade, pois não seria possível quantificar poros que fossem menores que esse tamanho de *pixel* (500 μm). A FIGURA 32 mostra a fotografia do estromatólito, e ao lado a seção tomográfica deste. Nessa análise tomográfica foram feitos 131 cortes (seções CT).

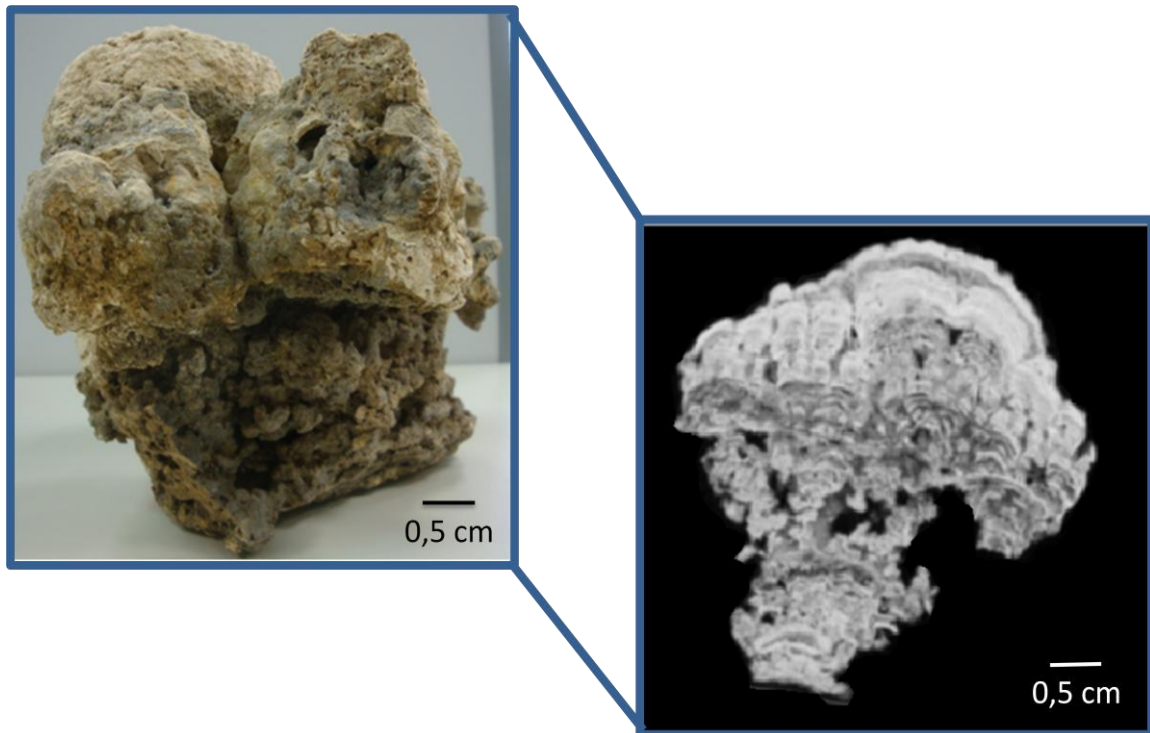


FIGURA 32 - Fotografia da cabeça de estromatólito à esquerda e seção tomográfica à direita.

Os parâmetros de aquisição da medida utilizado nas amostras foram tensão de 140 KV, corrente de 380 mA e tempo aproximadamente dois minutos.

As imagens, em duas dimensões, foram binarizadas, sendo realizada a quantificação com auxílio do programa CTAn (FIGURA 33) e em seguida reconstruída em três dimensões pelo programa CTVol (FIGURA 34).

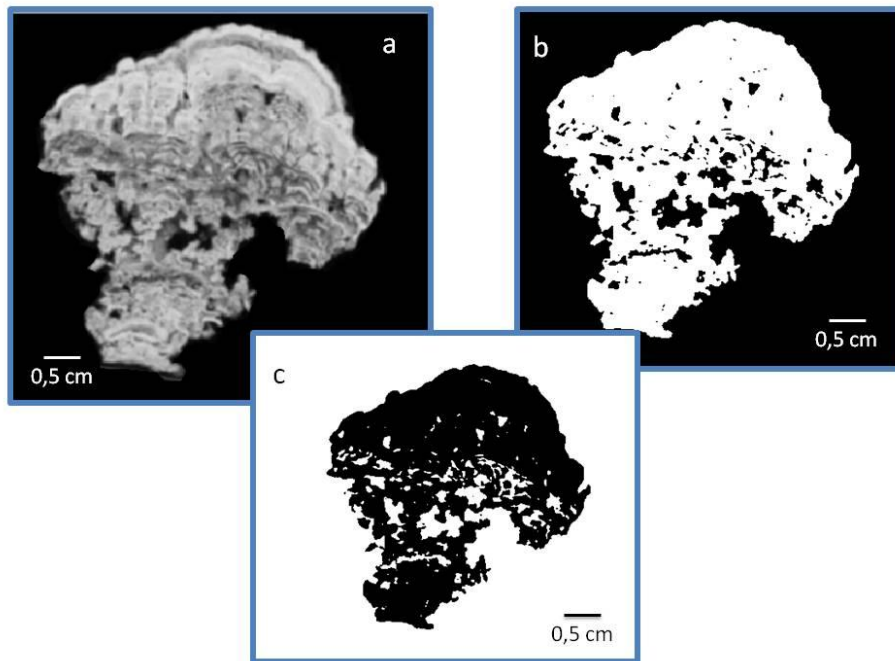


FIGURA 33 - (a) seção tomográfica. (b) binarização das seções tomográficas, poros em preto e rocha em branco. (c) binarização das seções tomográficas, poros em branco e rocha em preto.

Observou-se nas seções tomográficas e nas seções binarizadas resultados próximos do que foi visto na descrição mesoscópica (FIGURA 30). Na camada superior vê-se porosidade fenestral e vugular, laminações finas e contínuas levemente onduladas. Já na camada intermediária constata-se porosidade vugular com uma variação no tamanho dos poros, na parte superior de C2 presença de porosidade fenestral. Na camada inferior uma porosidade vugular e arredondada. É importante ressaltar, mais uma vez que, como as resoluções dessas imagens são baixas, foi possível visualizar somente os poros maiores que o tamanho do *pixel* (500 μm).

As seções tomográficas foram binarizadas (preto e branco), visualizando-se apenas duas fases (FIGURA 33), rocha e poro. Foi realizada a quantificação dessas fases, poro e rocha. Posteriormente, foi feito um modelo tridimensional (FIGURA 34), gerado através do empilhamento das seções tomográficas, executado no programa computacional CTVol.

A FIGURA 34 ilustra o empilhamento das seções tomográficas, formando uma imagem reconstruída em três dimensões. Os poros estão representados em azul e a rocha em cinza. A FIGURA 34a representa somente os poros, a FIGURA

34b ilustra a rocha com os poros, e a FIGURA 34c mostra somente a rocha. Nessas imagens é possível perceber uma porosidade bem menor na camada superior comparada com as outras duas, sendo que a C2 é a mais porosa.

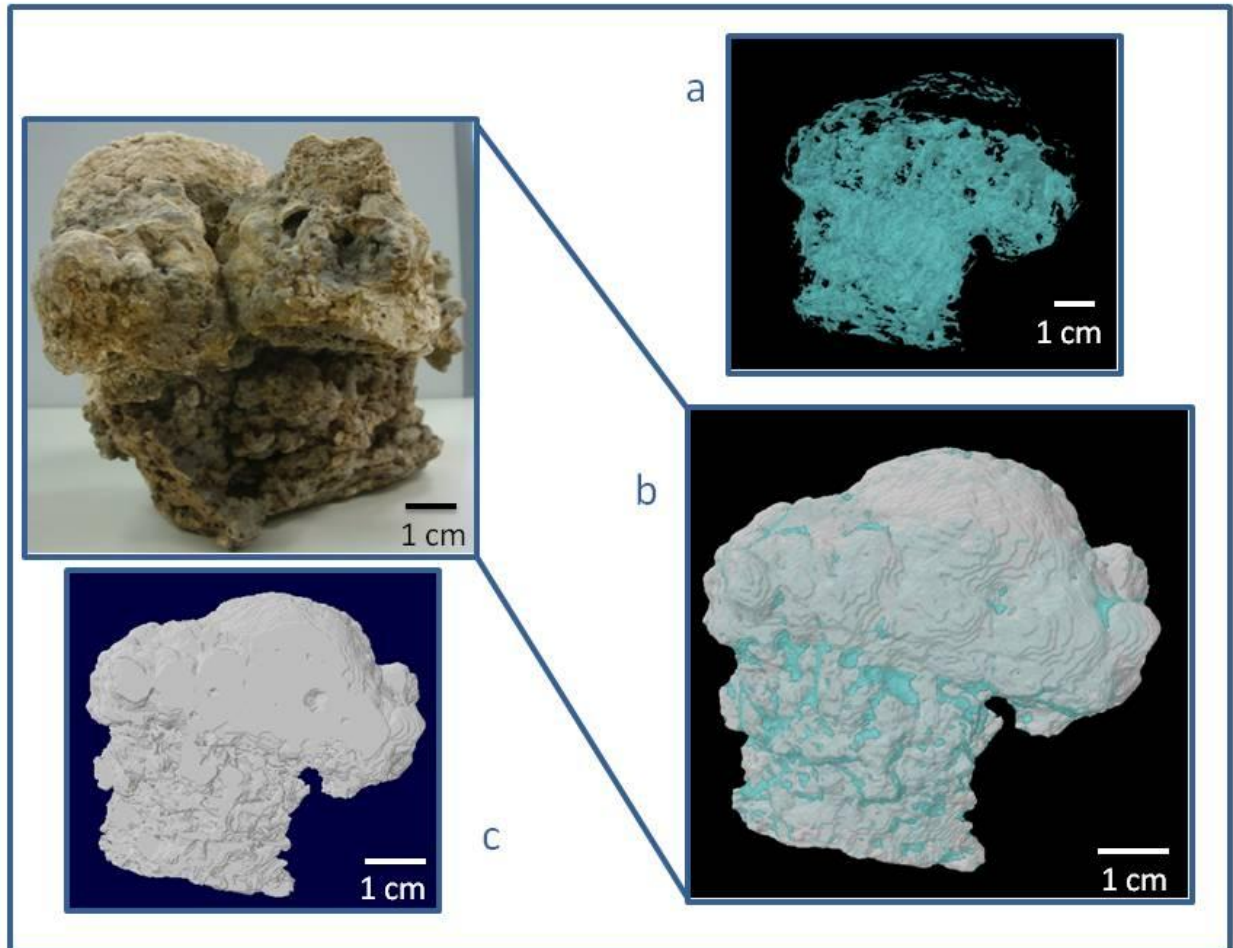


FIGURA 34 - (a) imagem somente dos poros (azul), (b) imagem em 3D de toda a rocha, (c) imagem somente da rocha (cinza).

A separação das fases, poros e rocha, e a quantificação destas, foram realizadas no programa CTAn, que possibilita quantificar os poros que tem conectividade e os que estão isolados (TABELA 1). É de suma importância, na exploração de petróleo e gás, saber a quantificação da porosidade com conectividade.

TABELA 1 - QUANTIFICAÇÃO DA POROSIDADE NA CABEÇA ESTROMATOLÍTICA

AMOSTRAS	ESTROMATÓLITO
Total de seções de micro-CT	131
Tamanho do pixel	500 μm
Volume de rocha	81,43 % (699,14 cm^3)
Volume de porosidade total	18,57 % (157,43 cm^3)
Volume de poros conectados	17,36 % (148,74 cm^3)
Volume de poros isolados	1,21 % (8,50 cm^3)

Realizou-se posteriormente a análise de microtomográfica, de porosimetria por injeção de mercúrio, a petrografia e a mineralogia, cujos resultados serão apresentados abaixo.

Para petrografia foram feitas dezessete lâminas petrográficas, sendo oito da camada superior (C1), três da camada intermediária (C2) e seis da camada inferior (C3). A FIGURA 35 ilustra os locais aproximados de onde foram coletadas as amostras, e as características presentes das lâminas petrográficas descritas. A porosidade está representada em azul escuro. Através da análise petrográfica é possível observar o sistema poroso em duas dimensões, no entanto se faz necessário uma visão tridimensional do arcabouço poroso, que pode ser visualizado através da microtomografia, sendo interessante a integração de técnicas para uma análise mais completa (REMENYSE & SWENNEN, 2007).

Para análise de microscopia eletrônica de varredura foram utilizadas duas lâminas petrográficas da camada superior (C1), com o intuito de verificar a presença de matéria orgânica.

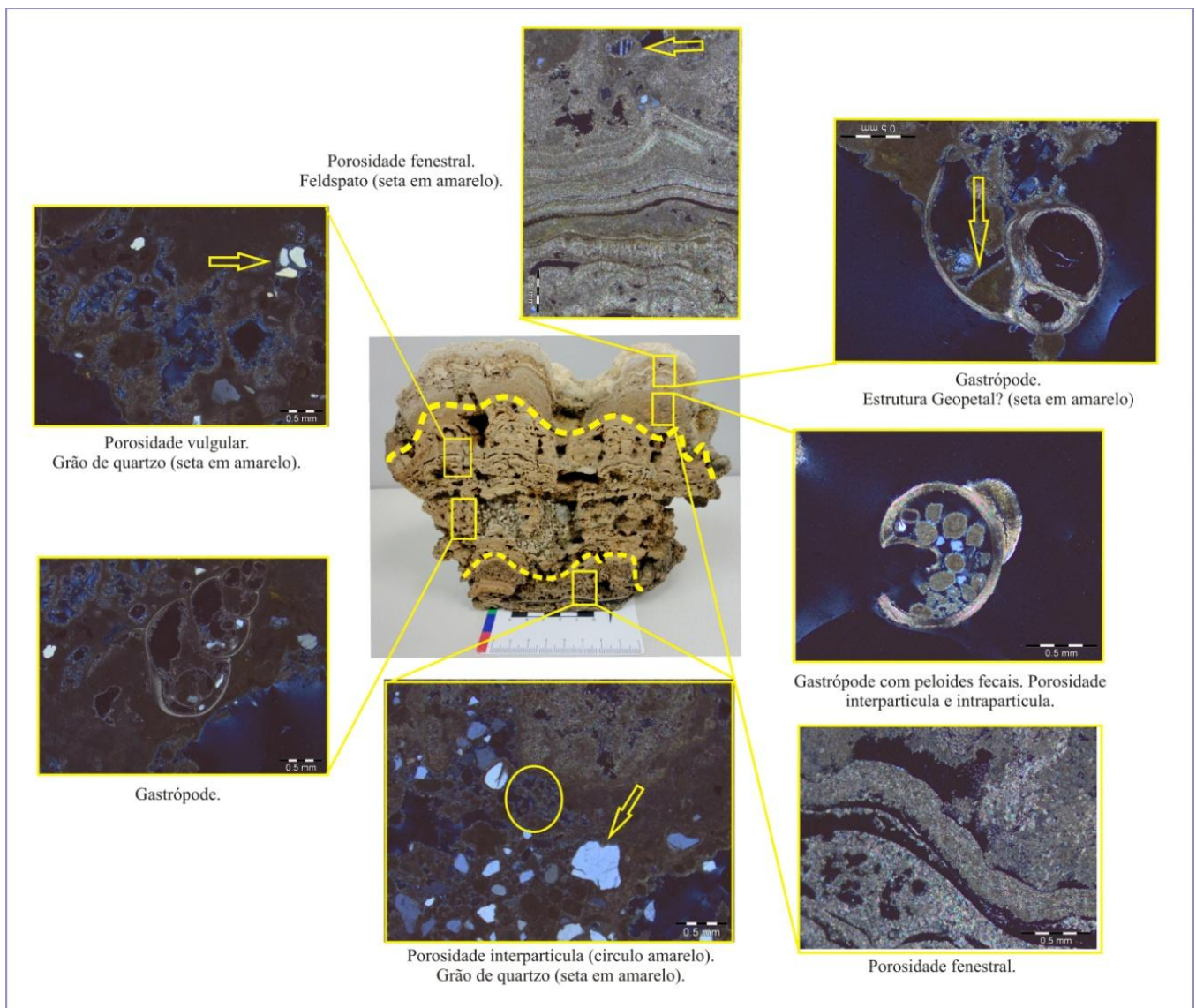


FIGURA 35 - Esquema dos locais aproximados onde foram coletadas amostras para serem confeccionadas as lamínas petrográficas.

Para análise de porosidade por micro-CT foram feitos oito amostragens, sendo três (C1-1, C1-2, C1-3) da camada superior (C1), duas (C2-1, C2-2) da intermediária (C2) e três (C3-1, C3-2, C3-3) da camada inferior (C3). A análise de micro-CT dessas amostras possibilitou identificar três fases: a rocha, os poros e um material denso.

A distribuição do tamanho de poro da micro-CT foi feita utilizando o programa IMAGO, e os valores médios foram calculados a partir da média dos parâmetros de cada uma das imagens binarizadas.

Por fim, realizou-se a análise mineralógica onde se coletou amostras em três pontos distintos em cada uma das camadas. Constatou-se uma grande variação mineralógica no estromatólito (calcita magnesiana, aragonita, entre outros minerais) e presença de material detrítico. Foi também identificado em algumas camadas um raro mineral de carbonato do grupo das dolomitas chamado kutnohorita ($\text{Ca (Mn, Mg, Fe)(CO}_3)_2$) (FRONDEL & BAUER, 1954). Realizaram-se análises mineralógicas para identificar um material denso encontrado na microtomografia e foi detectada pirita, um mineral com densidade alta que varia de $4,95 \text{ g/cm}^3$ a $5,10 \text{ g/cm}^3$.

5.1 CAMADA INFERIOR (C3)

A camada inferior tem 4,0 cm de espessura, sendo composta por esteiras contínuas (FIGURA 30). Na parte inferior da cabeça há uma crosta de coloração escura e mais rígida, que serviu de base para o crescimento da cabeça. A camada C3 foi subdividida em C3a e C3b (FIGURA 30). Em C3a a porosidade foi criada por bioturbação (tubo de vermes), por suas características físicas, poros bem arredondados (poros vugulares menores que na C2) (FIGURA 36). A camada C3b é composta por esteiras contínuas com porosidade vugular de tamanho variado.

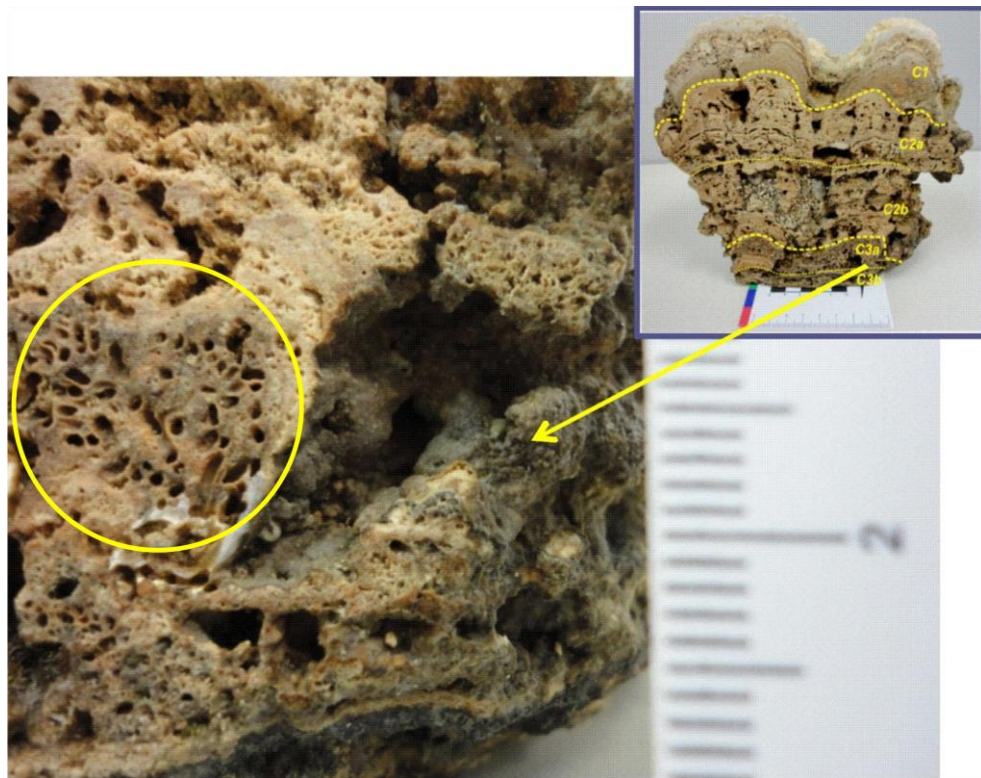


FIGURA 36 – Camada inferior (C3), com porosidade formada através de bioturbação (circulo amarelo).

A camada C3 é composta por esteiras continuas sendo que C3a não apresenta laminação e C3b contém laminação, sendo a camada que contém maior quantidade de grãos de quartzo imerso em lama micrítica. É composta por porosidade vugular, caverna, intrapartículas e interpartículas (FIGURA 37 e FIGURA 38).

Verificou a presença de gastrópodes (FIGURA 37a, b e c) e ostracodes (FIGURA 37c e d). Camada com alta concentração de grãos de quartzo e pelóides fecais (FIGURA 37 e FIGURA 38).

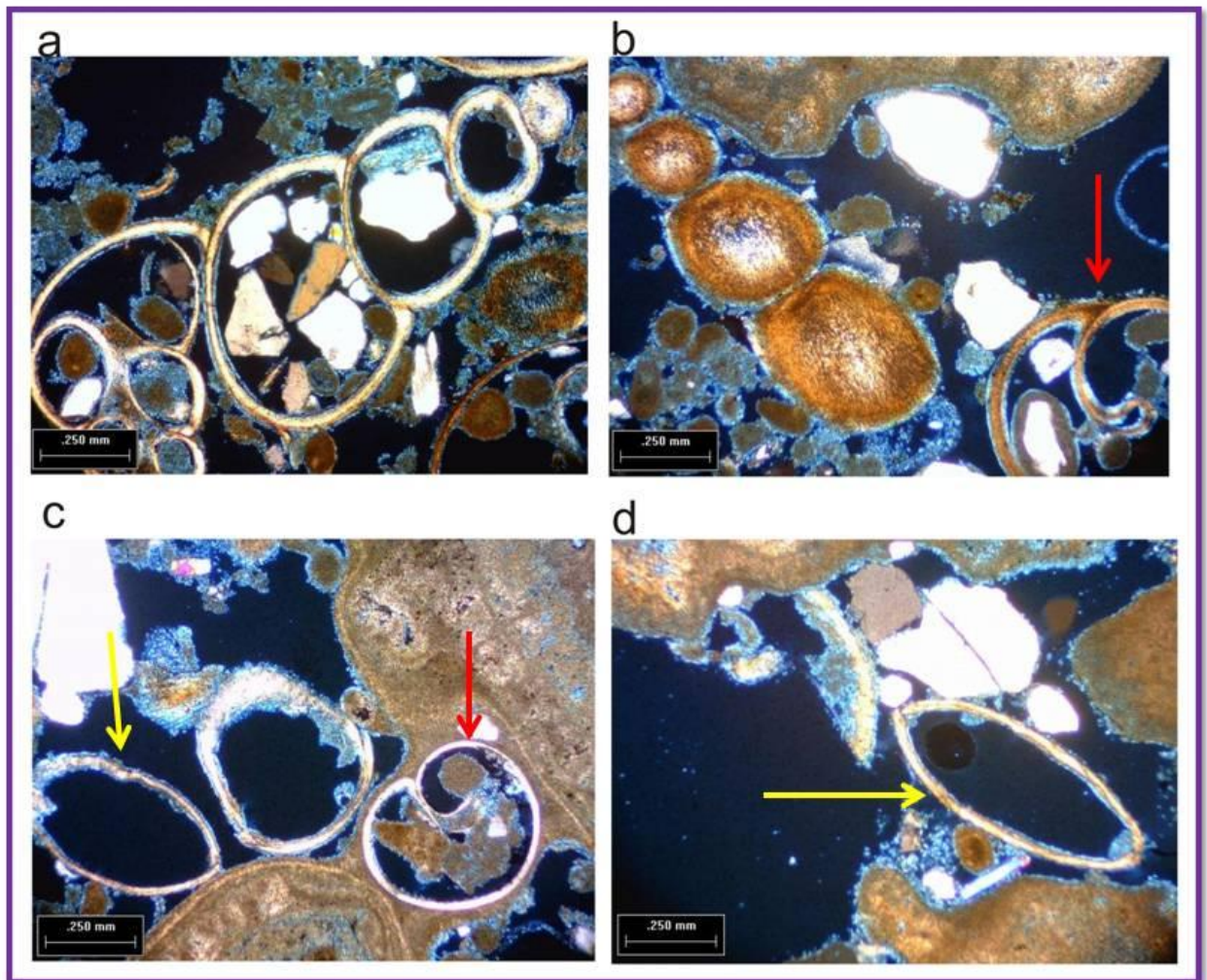


FIGURA 37 - Fotomicrografia da camada C3 (a) porosidade interpartícula, intrapartícula e vugular; presença de gastrópodes, peloides fecais e grãos de quartzo. (b) porosidade interpartícula, intrapartícula e vugular, gastrópode (seta vermelha). (c) porosidade interpartícula, intrapartícula e vugular; gastrópode (seta vermelha); ostracodes (seta amarela). (d) porosidade interpartícula, intrapartícula, caverna e vugular; ostracodes (seta amarela).

Observou-se que na camada C3a a maioria dos poros são bem arredondados por terem sido formados por bioturbação boring (FIGURA 38 a e b), os demais poros são angulosos (FIGURA 37c e d). Segundo Lemos (1996) essa presença de bioturbação causada por tubos de vermetídeos sugere uma fase de micritização, são resultados de uma ação intensa de microorganismos junto ao substrato carbonático, impedindo a formação de laminações.

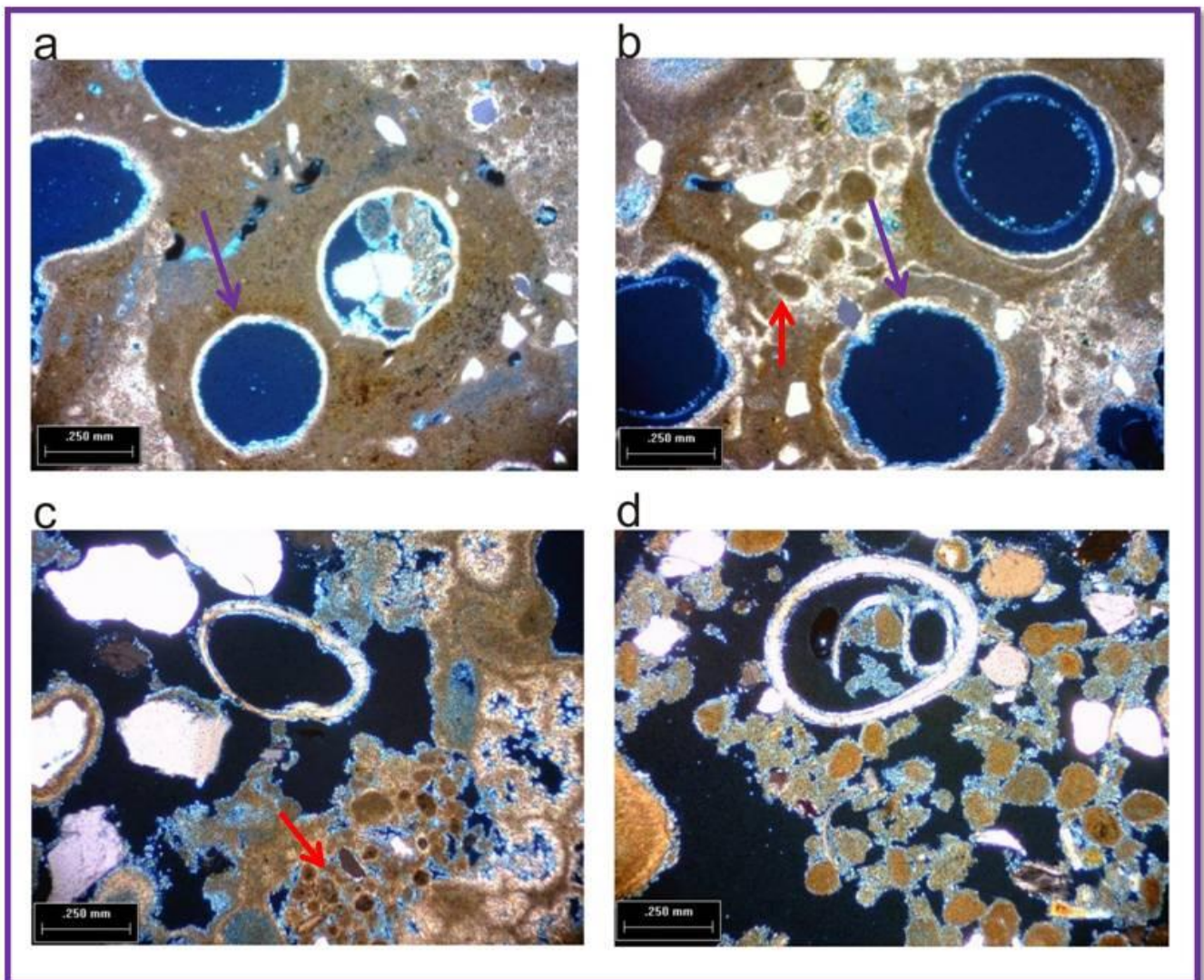


FIGURA 38 - Fotomicrografia da camada C3 (a) porosidade interpartícula e intrapartícula, presença de bioturbação (seta roxa). (b) porosidade causada por bioturbação (seta roxa), pelóides fecais (seta vermelha). (c) porosidade vugular, interpartícula e intrapartícula; pelóides fecais (seta vermelha). (d) porosidade vugular, interpartícula e intrapartícula.

A porosidade em C3 é mais homogênea em relação à morfologia e tipologia dos poros. O percentual médio de porosidade absoluta é de 25%, de porosidade efetiva de 24% e apenas 1% de porosidade sem conectividade. Constatou-se que a porosidade quantificada em C3 é menor que a quantificada em C2. Foram coletadas três amostras dessa camada em diferentes locais para melhor representação. As amostras foram nomeadas como: C3-1, C3-2 e C3-3.

A amostra C3-1 possui dimensões de 1,0 cm x 1,0 cm x 1,5 cm (FIGURA 39b) e está localizada na subcamada C3b. O tempo aquisição dos dados foi de uma

hora e dois minutos, e a resolução foi de 9,5 μm . A FIGURA 40a corresponde a uma das 1203 seções microtomográficas, com a área de interesse selecionada (ROI). A FIGURA 40b corresponde à área de interesse binarizada, com poros em branco e rocha em preto. Os parâmetros físicos utilizados foram: tensão de 65 KV, corrente de 150 μA e filtro de alumínio e cobre. A radiação que conseguiu atravessar a amostra é de 42, 2%.

O volume selecionado para o estudo é de 143,84 mm^3 (FIGURA 39c). O volume de rocha é 110, 38 mm^3 (76,54%), e de porosidade absoluta (FIGURA 40c) é de 33,45 mm^3 (23,45%).

TABELA 2 - QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME SELECIONADO NA CAMADA INFERIOR (C3) DADO PELA MICRO-CT

Amostras	C3-1	C3-2	C3-3
Total de seções de micro-CT	1203	1335	1254
Tamanho do pixel	9,54 μm	9,54 μm	10, 18 μm
Volume total	143,84 mm^3	179,47 mm^3	263, 72 mm^3
Volume de rocha	76,54 % (110,38 mm^3)	76,04 % (136,89 mm^3)	72, 69 % (192,45 mm^3)
Volume de material denso	0,01 % (0,01 mm^3)	0,14 % (0,26 mm^3)	0,06 % (0,15 mm^3)
Volume de porosidade total	23,45 % (33,45 mm^3)	23,82 % (40,93 mm^3)	27,25 % (71,12 mm^3)
Volume de poros conectados	22,58 % (32,48 mm^3)	22,81 % (40, 93 mm^3)	26,18 % (69,04 mm^3)
Volume de poros isolados	0,87 % (0,97 mm^3)	1,01 % (1,39 mm^3)	1,07 % (2,08 mm^3)

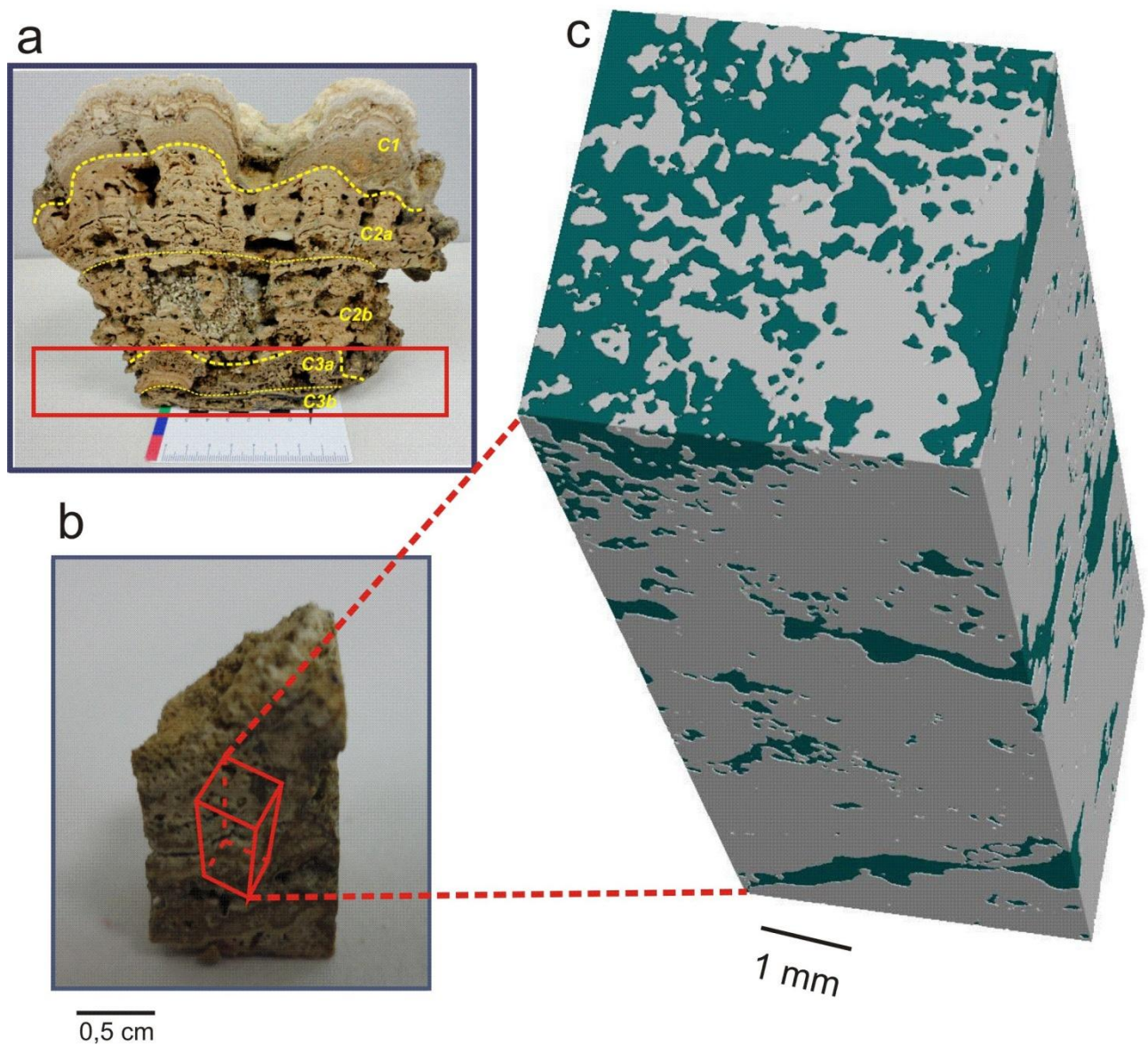


FIGURA 39 – Resultados qualitativos do volume selecionado da amostra C3-1. (a) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada. (b) fotografia da amostra analisada com o volume de estudo demarcado. (c) amostra reconstruída em três dimensões (poros – azul; rocha – cinza).

A FIGURA 40 mostra os resultados qualitativos da porosidade da amostra C3-1. Pode-se visualizar pela FIGURA 40a e b, a seção microtomografica e a área selecionada binarizada, que a maioria dos poros são alongados e estão seguindo a laminação

A tipologia da porosidade encontrada em C3-1 são vulgar e caverna. A FIGURA 40c ilustra os poros reconstruídos em três dimensões, onde se pode visualizar que a maioria dos poros estão conectados e assim como foi quantificado e está expresso na TABELA 2.

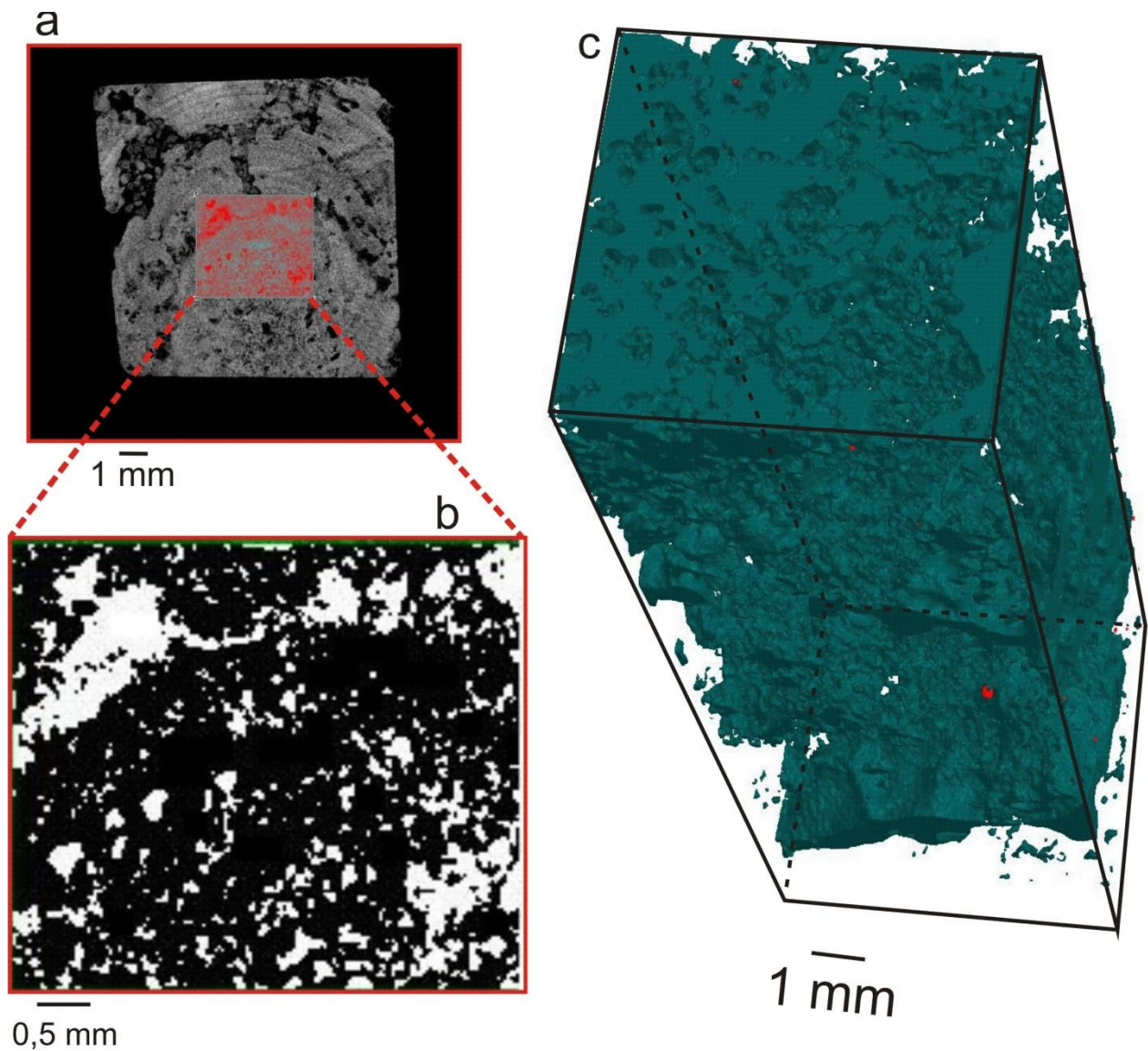


FIGURA 40 - Resultados qualitativos dos poros da amostra C3-1 (a) seção micro-CT, com o ROI em vermelho. (b) seção selecionada (ROI) binarizada. (c) imagem em três dimensões dos poros (azul) e pirita (vermelho).

A distribuição média do tamanho de poro em duas dimensões da amostra C3-1 para micro-CT observa-se que no intervalo 240-270 μm tem-se um pico de 25% na frequência (FIGURA 41 - em verde).

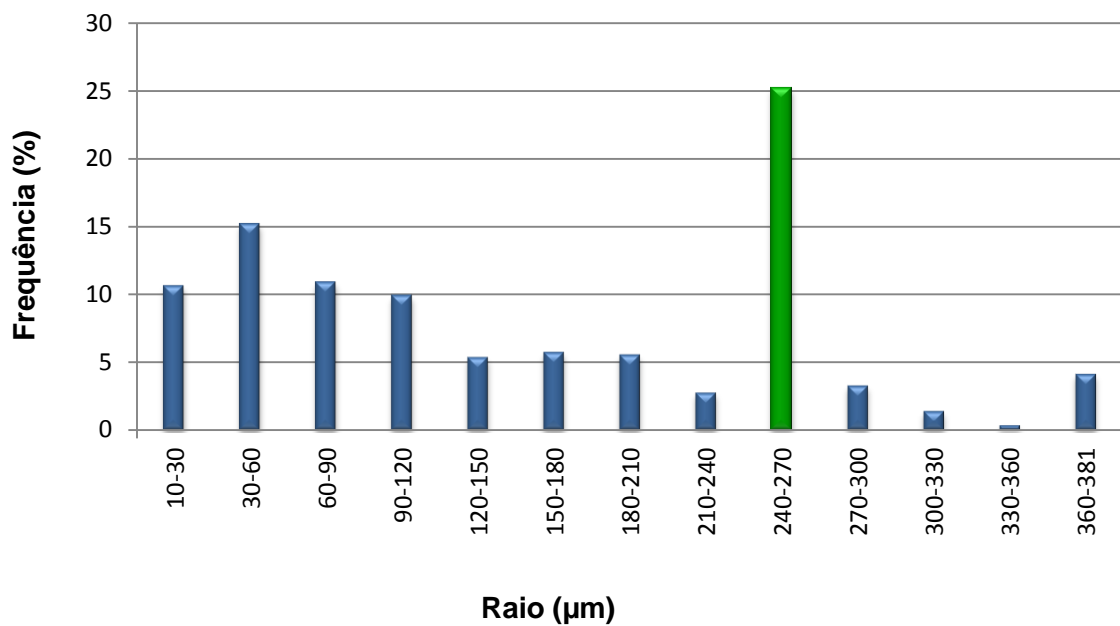


FIGURA 41 - Distribuição de tamanho de poro em 2D da amostra C3-1.

A amostra C3-2 tem dimensões de 1,0 cm x 1,0 cm x 1,4 cm (FIGURA 42b) e está localizada na subcamada C3a. O tempo de aquisição, obtenção das imagens microtomográficas, foi de uma hora e trinta e nove minutos, com um tamanho de *pixel* de 9,54 µm. Os parâmetros físicos utilizados foram: tensão de 70 KV, corrente de 140 µA e o filtro de alumínio e cobre. A radiação que atravessou a amostra foi de 53,8% da radiação total.

A FIGURA 43a representa uma das 1335 seções microtomográficas com a área de interesse selecionada em vermelho (ROI), o ROI binarizado, poros em branco e rocha em preto (FIGURA 43b).

O volume selecionado para análise é de 179,47 mm³ (FIGURA 42c), sendo que o volume de rocha quantificado foi de 136,89 mm³ (76,04%) e de porosidade absoluta um volume de 40,93 mm³ (23,82%).

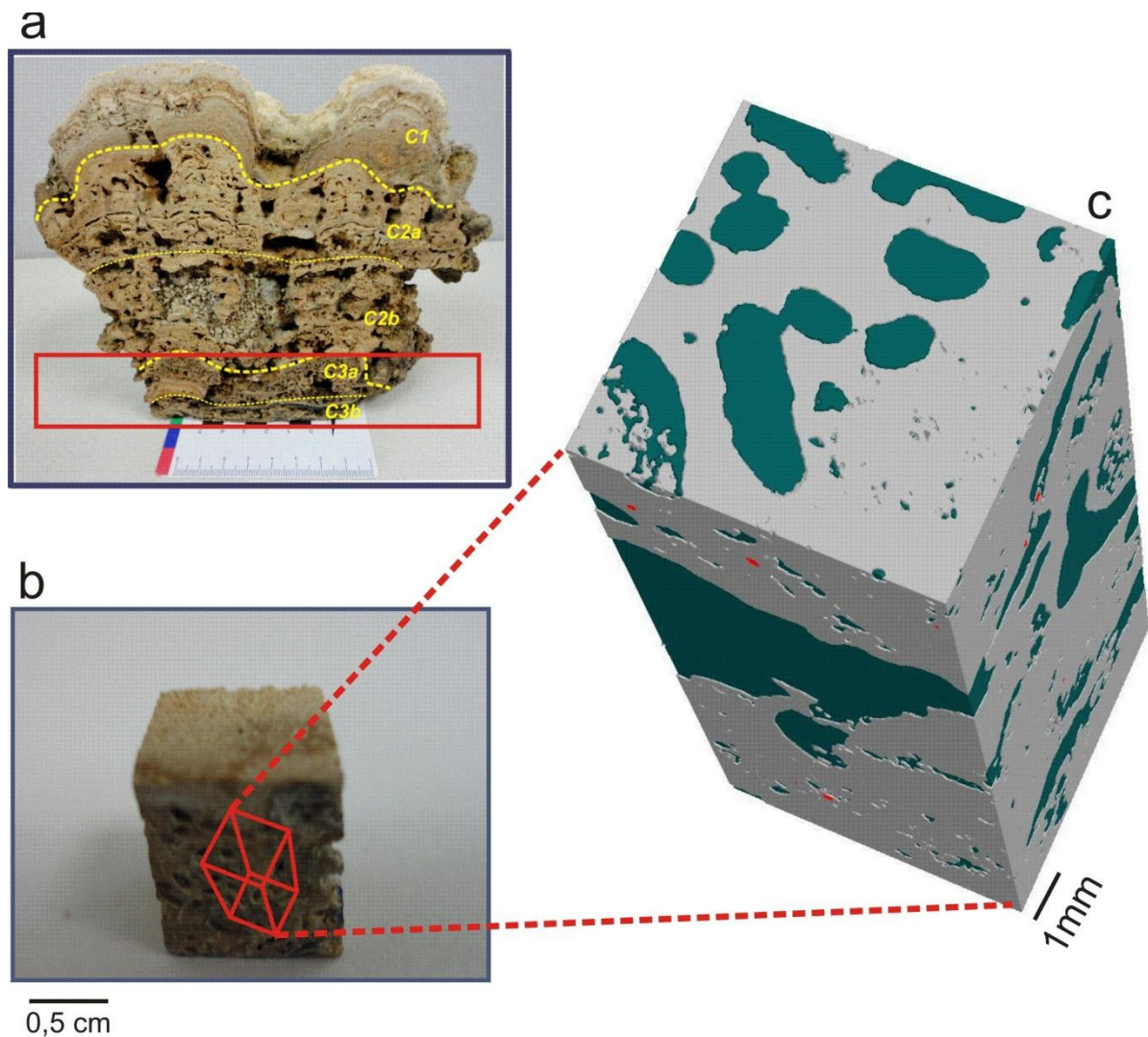


FIGURA 42 - Resultados qualitativos do volume selecionado da amostra C3-2. (a) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada (b) fotografia da amostra analisada com o volume de estudo demarcado. (c) amostra reconstruída em 3D (poros – azul; rocha – cinza; pirita - vermelha).

As imagens microtomográficas e binarizadas auxiliam na identificação da tipologia e morfologia dos poros. A imagem em três dimensões mostrou a morfologia e conectividade dos poros (FIGURA 43 a, b e c). Visualizou-se predominância de porosidade tipo caverna, mas também constatou porosidade vugular e presença de poros arredondados e alongados. Os poros maiores estão interconectados por poros menores.

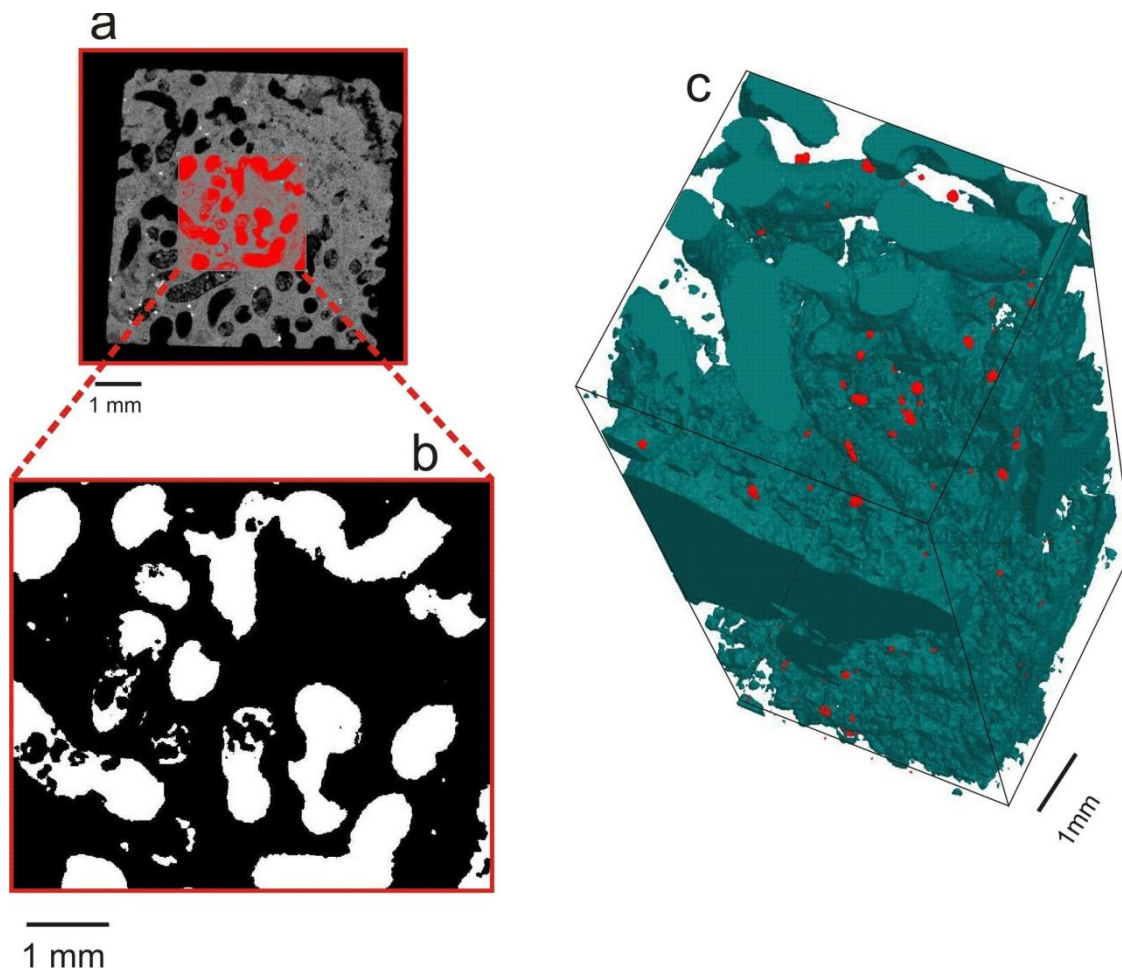


FIGURA 43 – Resultados qualitativos dos poros da amostra C3-2. (a) seção micro-CT, com o ROI em vermelho. (b) seção selecionada (ROI) binarizada. (c) imagem em três dimensões dos poros (azul) e pirita (vermelho)

A quantificação dessa amostra constatou uma porosidade efetiva de 22,81% ($40,93 \text{ mm}^3$), sendo um percentual alto comparado com a porosidade total, restando apenas 1,01% ($1,39 \text{ mm}^3$) de poros isolados (TABELA 2).

A distribuição média do tamanho de poro bidimensional da amostra C3-2 mostra que, se tem um pico de aproximadamente 22% de frequência de poros que estão localizados no intervalo de 1200 a 1300 μm (FIGURA 44 - verde). O gráfico da FIGURA 44 apresenta em vermelho os resultados acima de 500 μm , ou seja, foram quantificados pelo tomógrafo médico e pela microtomografia, o que está em azul foram somente quantificados pela microtomografia.

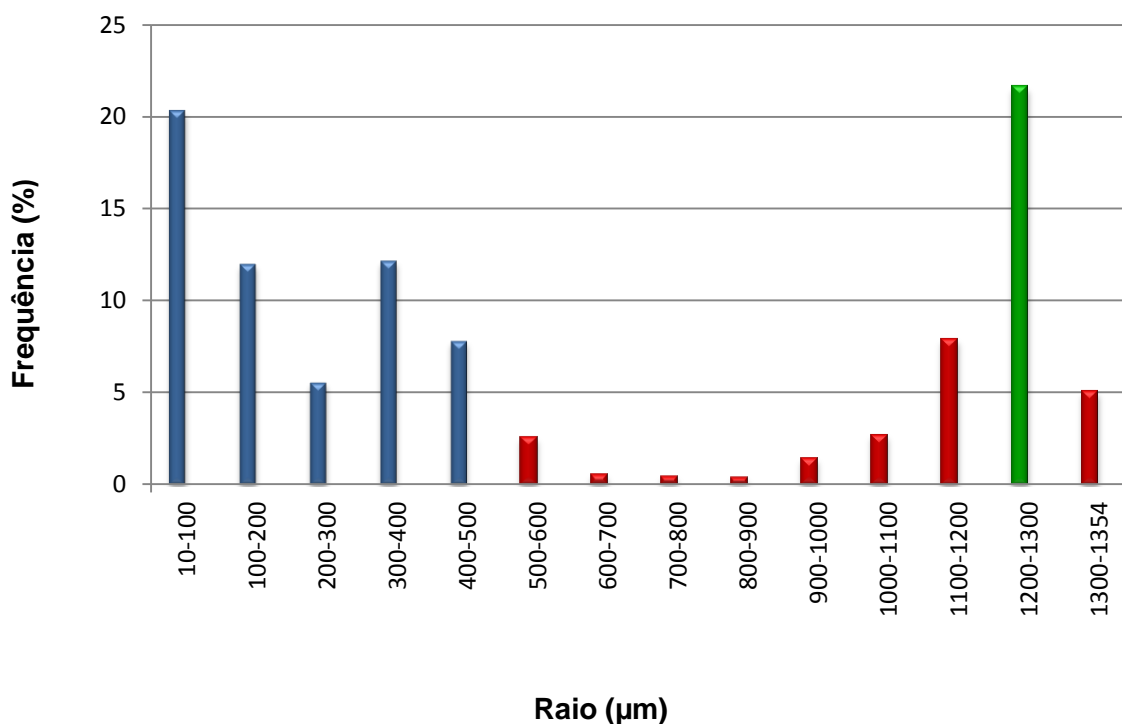


FIGURA 44 - Distribuição de tamanho de poro bidimensional da amostra C3-2 (azul – abaixo que 500 µm; vermelho – acima de 500 µm; verde - maior frequência).

A amostra C3-3 possui dimensões 1,2 cm x 0,8 cm x 2,2 cm (FIGURA 45b) e está localizada na subcamada C3b. O tempo de aquisição, obtenção dos dados microtomográficos, foi de uma hora e trinta e nove minutos, com tamanho de *pixel* de 10,3 µm. Os parâmetros físicos utilizados foram: tensão de 70 KV, corrente 140 µA e filtro alumínio. A radiação que ultrapassou a amostra foi 52, 3% da radiação total.

As FIGURA 45 e FIGURA 46 representam os resultados qualitativos obtidos da amostra C3-3, onde a FIGURA 46a é uma das 1254 seções microtomográficas com a área de interesse demarca em vermelho, tem-se o ROI binarizado com rocha em preto e poro em branco representado pela FIGURA 46b.

O volume selecionado para ser analisado foi de 263,72 mm³ (FIGURA 45c), sendo que o volume de rocha é de 72,69% (192,45 mm³), (FIGURA 46c; TABELA 2).

A FIGURA 46c mostra a área selecionada em três dimensões, o qual é possível visualizar a forma, tamanho e disposição dos poros.

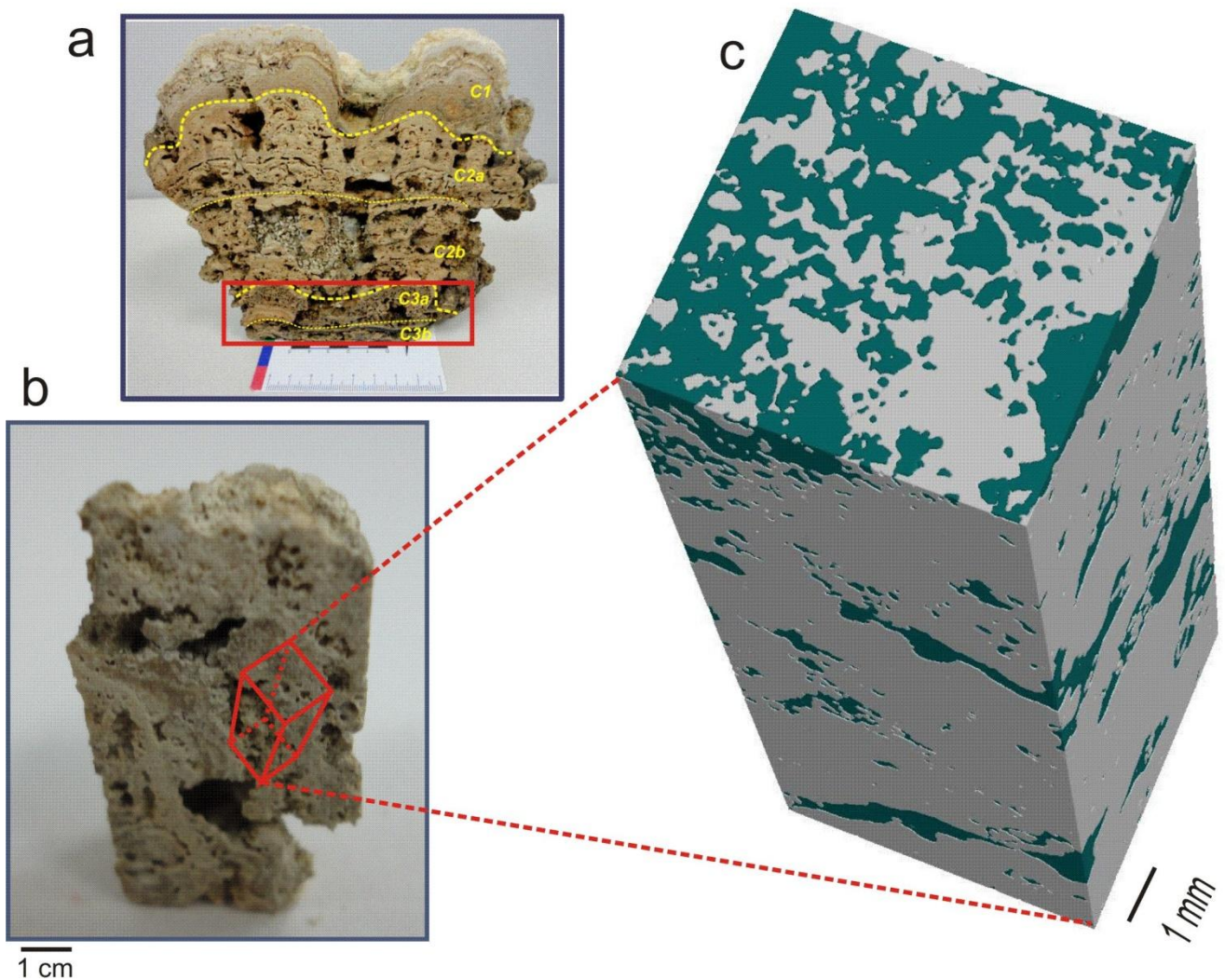


FIGURA 45 – Resultados qualitativos do volume selecionado da amostra C3-3. (a) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada. (b) fotografia da amostra analisada com o volume de estudo demarcado. (c) parte selecionada da amostra reconstruída em 3D.

O volume de porosidade absoluta quantificada é de 27,25% ($71,12 \text{ mm}^3$), no qual a porosidade de interesse, efetiva, é de 25,18% ($69,04 \text{ mm}^3$), e restando apenas 1,07% ($2,08 \text{ mm}^3$) de porosidade isolada (TABELA 2).

A imagem tomográfica e a binarizada possibilitam visualizar a tipologia e morfologia dos poros (FIGURA 46). Verificou-se que os poros são angulosos variando de tamanho. A FIGURA 46a e b presença de porosidade vugular, cavernas e em menor proporção fenestral. Os poros maiores estão interconectados por poros menores, vistos na amostra em três dimensões (FIGURA 46c).

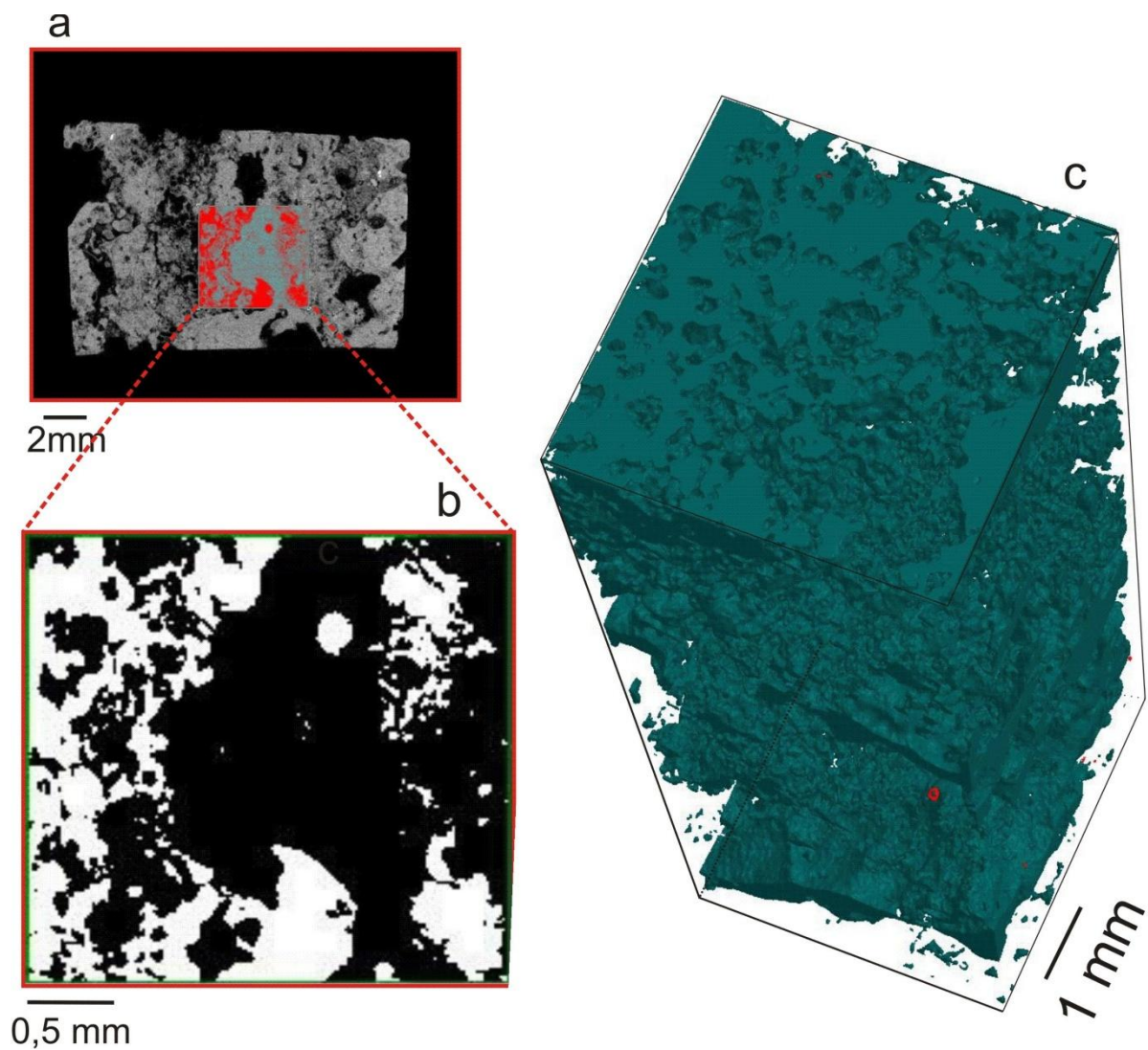


FIGURA 46 - Resultados qualitativos dos poros da amostra C3-3. (a) imagem microtomográfica com o ROI em vermelho. (b) seção selecionada binarizada. (c) poros da área selecionada reconstruído em 3D.

A distribuição média de tamanho de poro bidimensional da amostra C3-3 tem-se certa homogeneidade na frequência de tamanho de poro, apresentando um pico de 18% de frequência no intervalo de raios 200-300 μm (FIGURA 47).

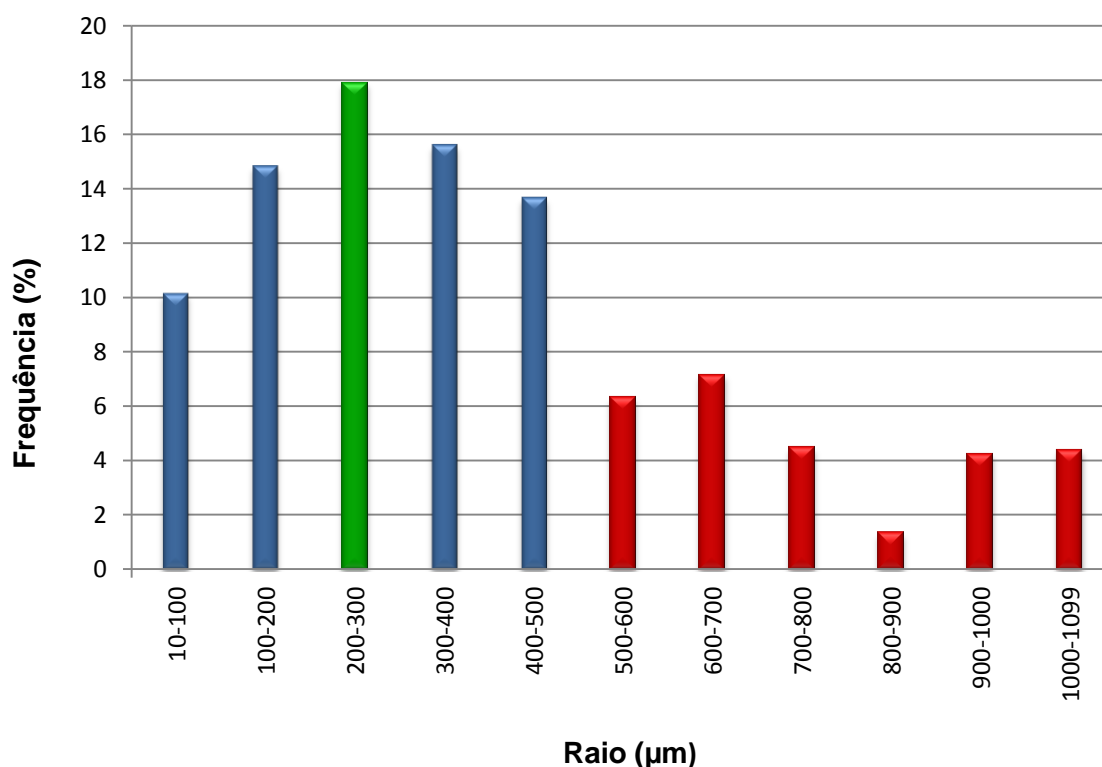


FIGURA 47 - Distribuição média de tamanho de poro bidimensional dado pela micro-CT da amostra C3-3 (azul – abaixo que 500 μm ; vermelho – acima de 500 μm ; verde - maior frequência).

A FIGURA 48 mostra os locais de onde foram coletadas amostras para análise DRX. Essa camada apresenta uma grande variação mineralógica. No ponto C3a-1 (FIGURA 49) constatou-se kutnohorita (30%), aragonita (24%) e quartzo (21%), e secundariamente, calcita magnesiana (15%) e pirita (11%).

No ponto C3a-2 (FIGURA 48 e FIGURA 49) há predominância de kutnohorita (72%) e em menor quantidade calcita magnesiana (28%). Por fim no ponto C3b-1 (FIGURA 48) não foi encontrado kutnohorita, e aumenta a quantidade de calcita magnesiana para 44%. A amostra C3b-1 é a mais rica em quartzo 36%,

aragonita (14%) e pouca pirita (6%). Os percentuais de minerais encontradas nas análises estão expressos na TABELA 3.

TABELA 3 - MINERAIS IDENTIFICADOS NA DRX DA C3

MINERAIS	C3a-1	C3a-2	C3b-1
Cacita Magnesia	15%	28%	44%
Quartzo	21%	-	36%
Pirita	11%	-	6%
Aragonita	24%	-	14%
Kutnohorita	30%	72%	-

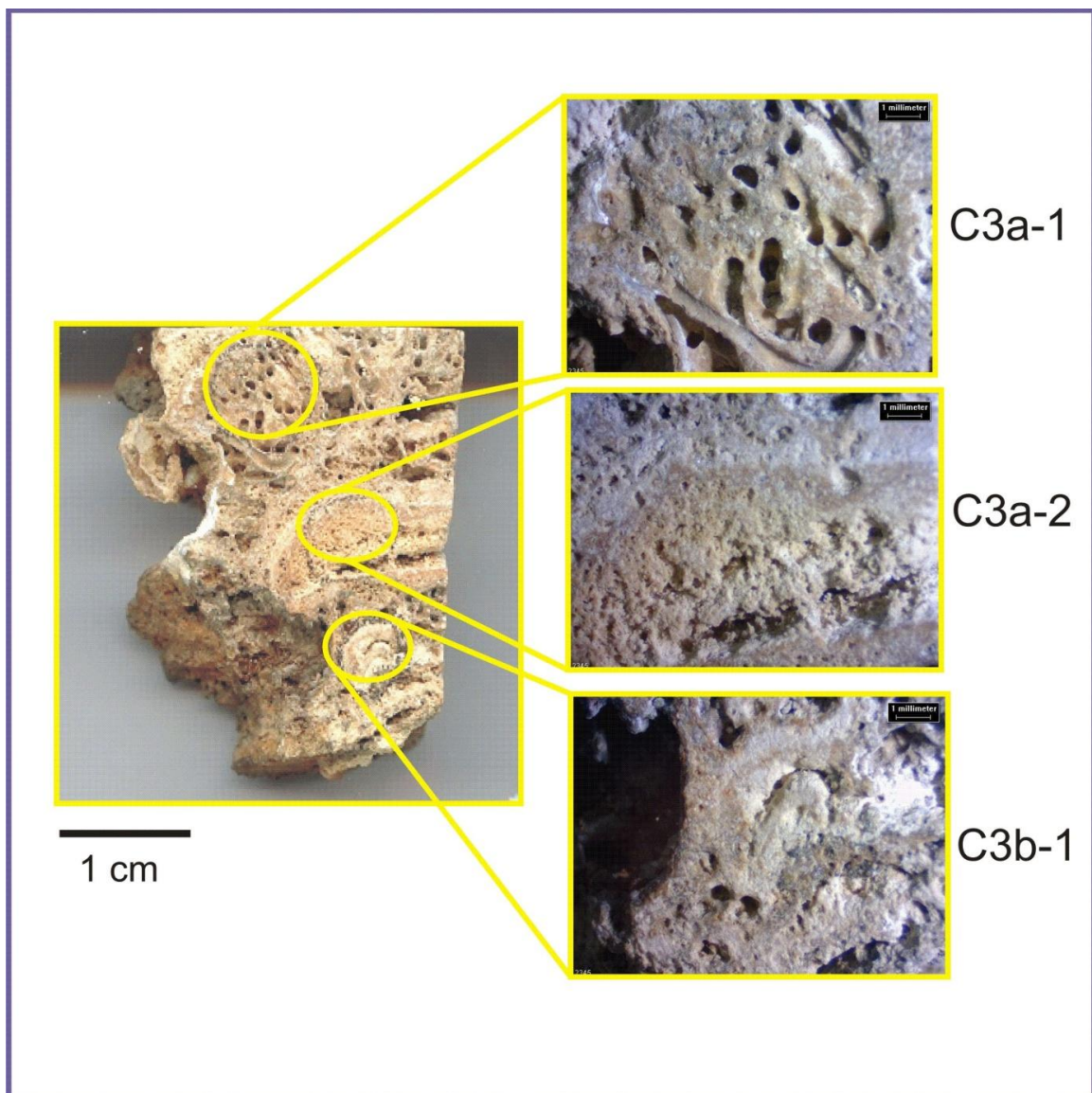


FIGURA 48 - Local onde foram coletadas amostras para análise mineralógica.

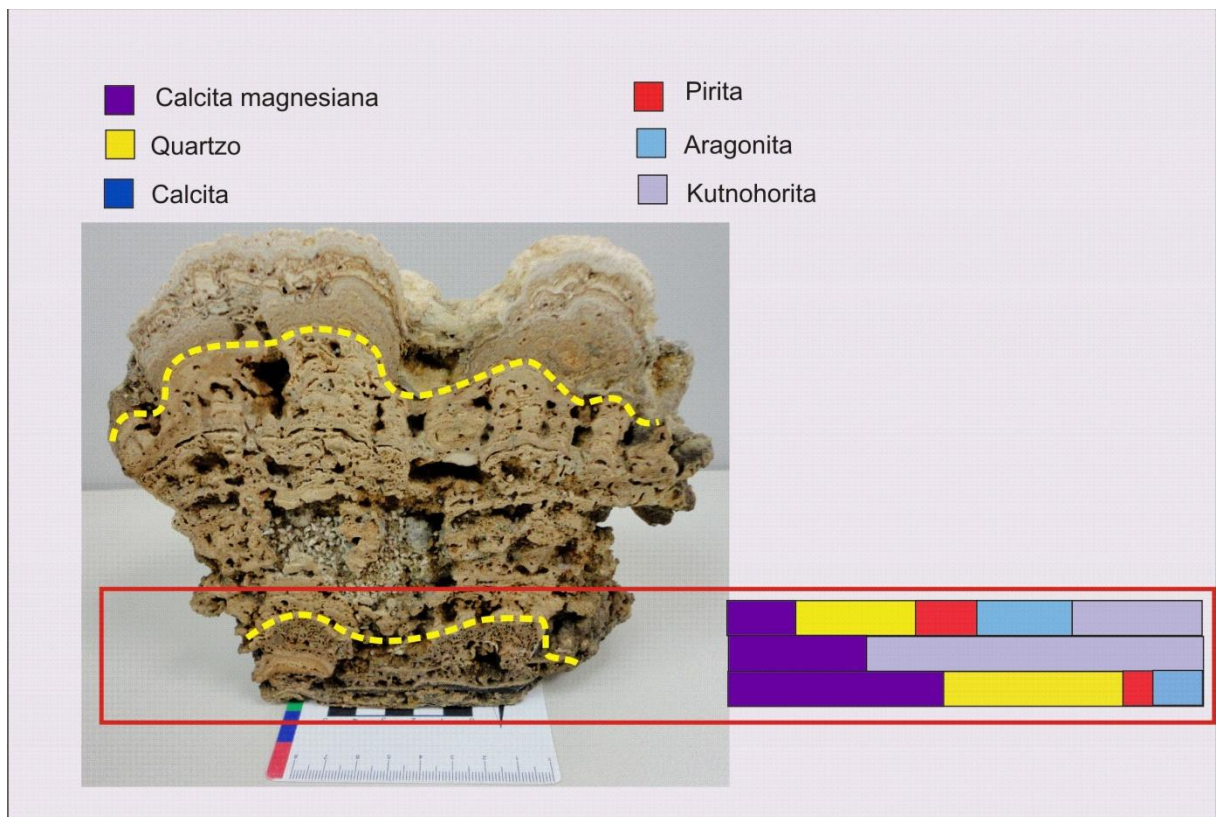


FIGURA 49 - Resultados da DRX de C3, ressaltando os principais minerais encontrados.

5.2 CAMADA INTERMEDIARIA (C2)

A camada intermediaria tem espessura de 8,0cm e é formada por esteiras com estruturas alveolares. Essa camada foi dividida em duas partes C2a e C2b (FIGURA 30). Na C2a ocorre porosidade vugular, cavernas e fenestral, com grande variação no tamanho e morfologia dos poros, variando em arredondados, angulosos e alongados, tanto na vertical quanto na horizontal. Em C2b tem-se porosidade do tipo vugular e caverna, com uma grande variação no tamanho e forma dos poros. Ocorre também porosidade interpartículas e intrapartículas, causadas pela grande concentração de gastrópodes (FIGURA 50).

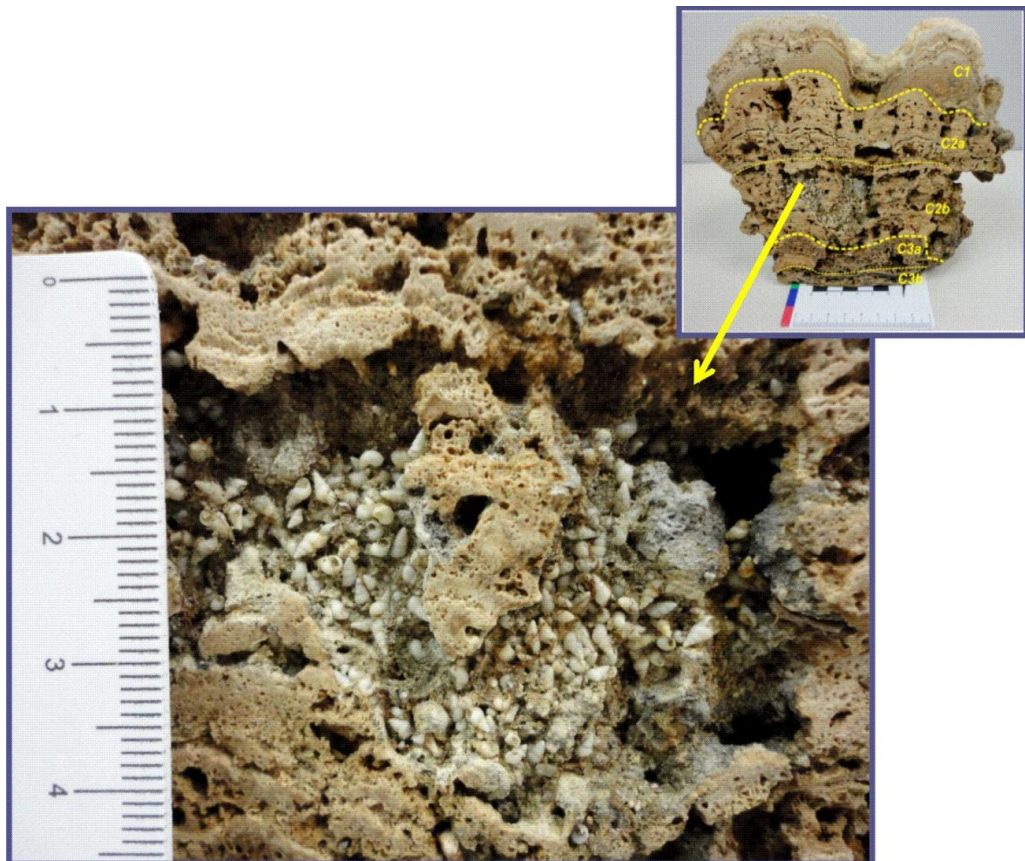


FIGURA 50 - Camada intermediária local com grande concentração de gastrópode.

A camada C2 apresenta porosidade vugular, caverna, interpartícula e intrapartícula, os poros são heterogêneos variando em tamanho e forma (FIGURA 51, FIGURA 52 e FIGURA 53). Há presença de grãos de quartzo e peloides fecais. Verificou-se presença de oólitos (FIGURA 51a) e bioclastos (FIGURA 51c e d; FIGURA 52a, c e d; FIGURA 53a).

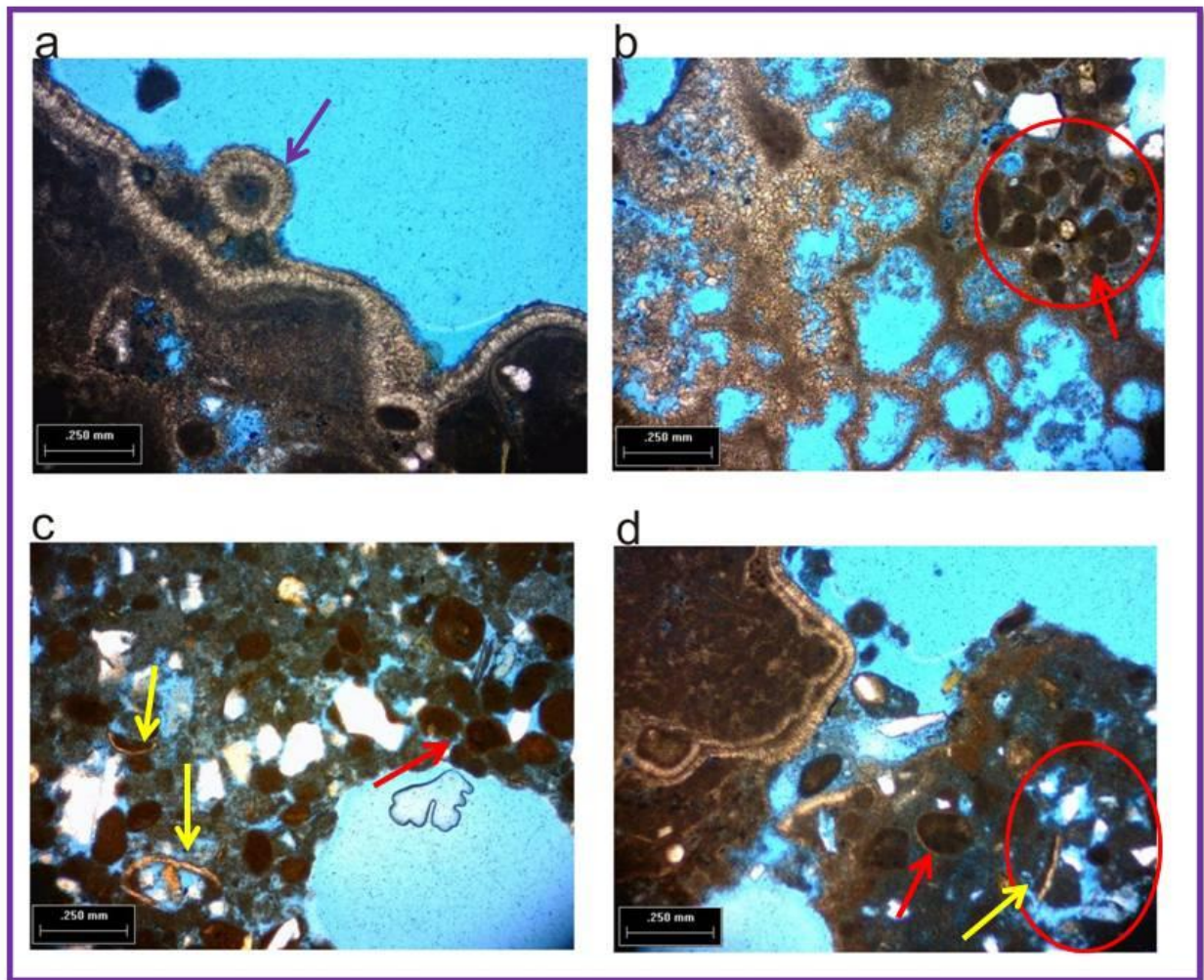


FIGURA 51 – Fotomicrografia da camada C2 (a) porosidade vugular em azul; oólitos (seta roxa). (b) porosidade vugular e interpartículas (circulo vermelho); pelóides fecais (seta vermelha). (c) porosidade vugular; pelóides fecais (seta vermelha); ostracodes (seta amarela), presença de grãos de quartzo. (d) porosidade vugular e interpartículas (circulo vermelho), pelóides fecais (seta vermelha), ostracodes (seta amarela).

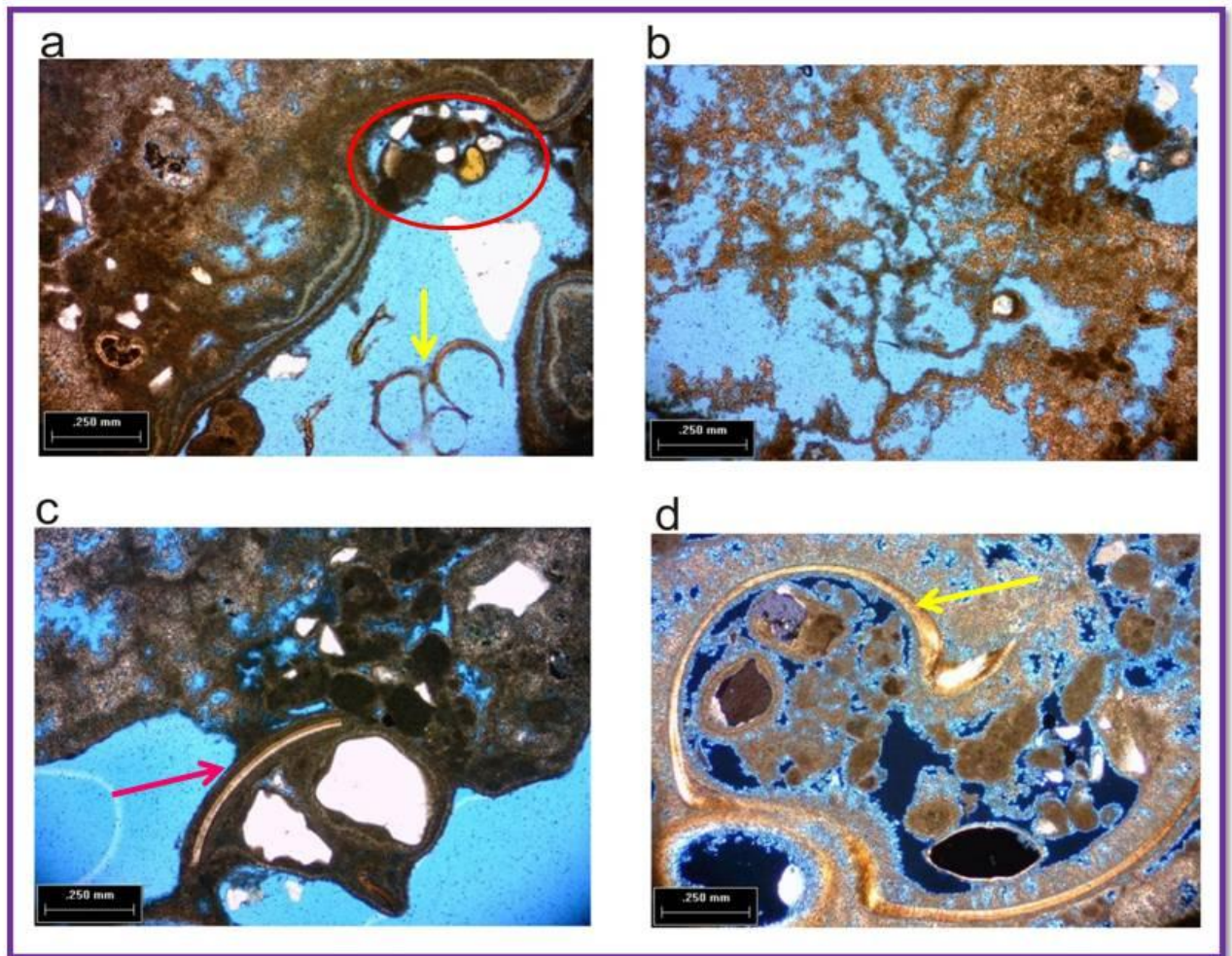


FIGURA 52 - Fotomicrografia da camada C2 (a) porosidade interpartícula (circulo vermelho) e vugular; ostracodes (seta amarela). (b) porosidade vugular. (c) porosidade vugular; bivalve (seta rosa); grãos de quartzo. (d) porosidade vugular e interpartículas e intrapartícula; ostracodes (seta amarela).

A camada C2 é rica em bioclastos, sendo identificados gastrópodes (FIGURA 53), em grande concentração, bivalves (FIGURA 52c) e ostracodes (FIGURA 51c e d; FIGURA 52a e d).

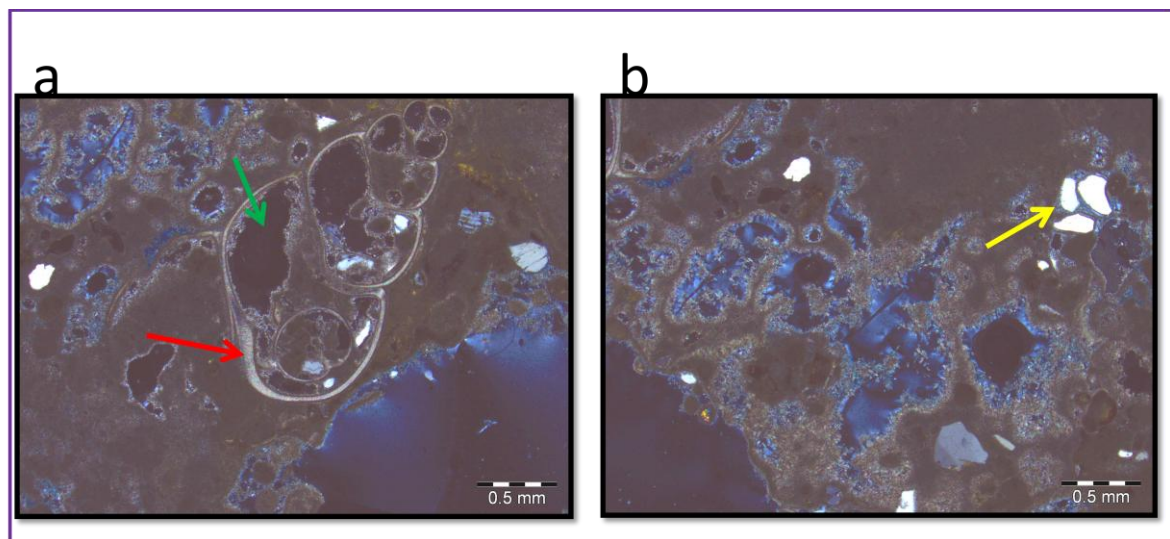


FIGURA 53 - Fotomicrografia da camada C2 (a) porosidade intrapartícula (seta verde), vugular e caverna; gastrópode (seta vermelha). (b) porosidade vugular e caverna; grãos de quartzo (seta amarela).

A camada C2 é a mais porosa comparada com as demais camadas, apresentando um percentual de 33,7% de porosidade absoluta, 33,1% de porosidade efetiva e apenas 0,56% de porosidade sem conectividade. A morfologia e a tipologia dos poros nessa camada são bem heterogêneas.

A camada C2 é a que apresenta maior percentual de porosidade. Os poros encontrados nessa camada são heterogêneos na tipologia, na morfologia e no tamanho. Nessa camada foram retiradas duas amostras para análise, que foram nomeadas de C2-1 e C2-2.

A amostra C2-1 tem dimensões de 1,0 cm x 1,2 cm x 2,0 cm (FIGURA 54b) e está localizada na subcamada C2a. A aquisição dos dados no microtomógrafo foi executada em uma hora e trinta e nove minutos, com um tamanho de pixel de 9,5 μm . Os parâmetros físicos são: tensão de 70 KV, corrente de 140 μA e filtro de alumínio e cobre. A radiação que conseguiu atravessar a amostra é 40,4% da radiação total.

A FIGURA 55 apresenta os resultados qualitativos da amostra C2-1, tem-se uma seção microtomográfica com área de interesse demarcada (ROI) em vermelho (FIGURA 55a), um ROI binarizado, poros estão em branco e a rocha em preto (FIGURA 54b) e imagem tridimensional da parte selecionada, rocha está em cinza, os poros em azul (FIGURA 54c e FIGURA 55c).

A quantidade de volume selecionada para ser quantificado foi de 265, 74 mm³. Onde 181,32 mm³ (68,01%) correspondem ao volume de rocha, e 0,07 mm³ (0,02%) de pirita. A FIGURA 54c mostra a área selecionada reconstruída em três dimensões, possibilitando visualizar a tipologia, morfometria e morfologia dos poros.

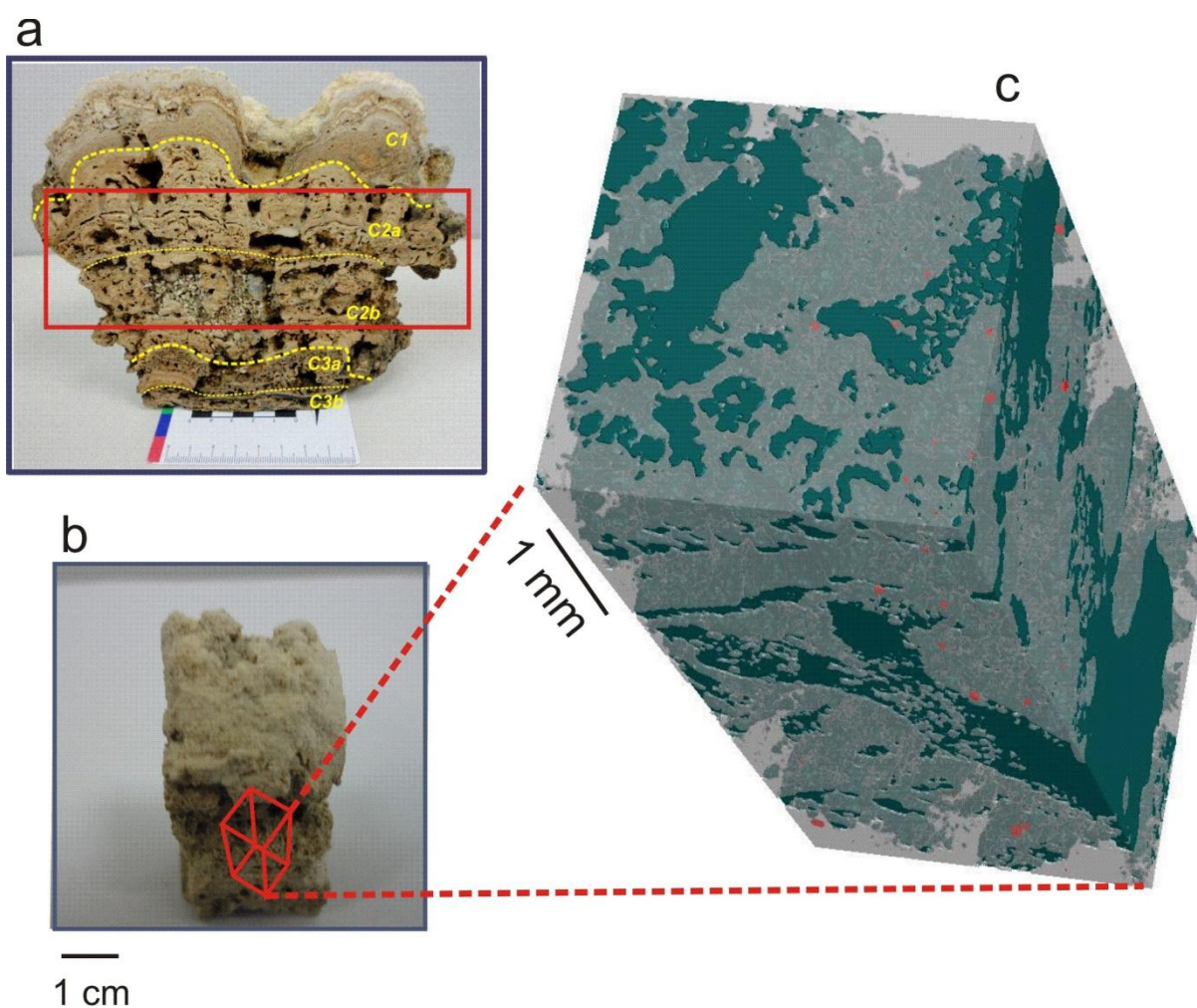


FIGURA 54 – Resultados qualitativos do volume selecionado da amostra C2-1. (a) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada. (b) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada. (c) parte selecionada da amostra reconstruída em 3D (poro – azul; rocha – cinza; pirita – vermelha).

Através das análises das seções tomográficas e da imagem em três dimensões foi possível visualizar porosidade fenestral, vugular e cavernas. Visualiza-se uma heterogeneidade na morfologia e tamanho dos poros, observando poros alongados, arredondados e angulosos. A imagem em três dimensões

possibilitou a observação dos poros maiores interconectados com os menores (FIGURA 55).

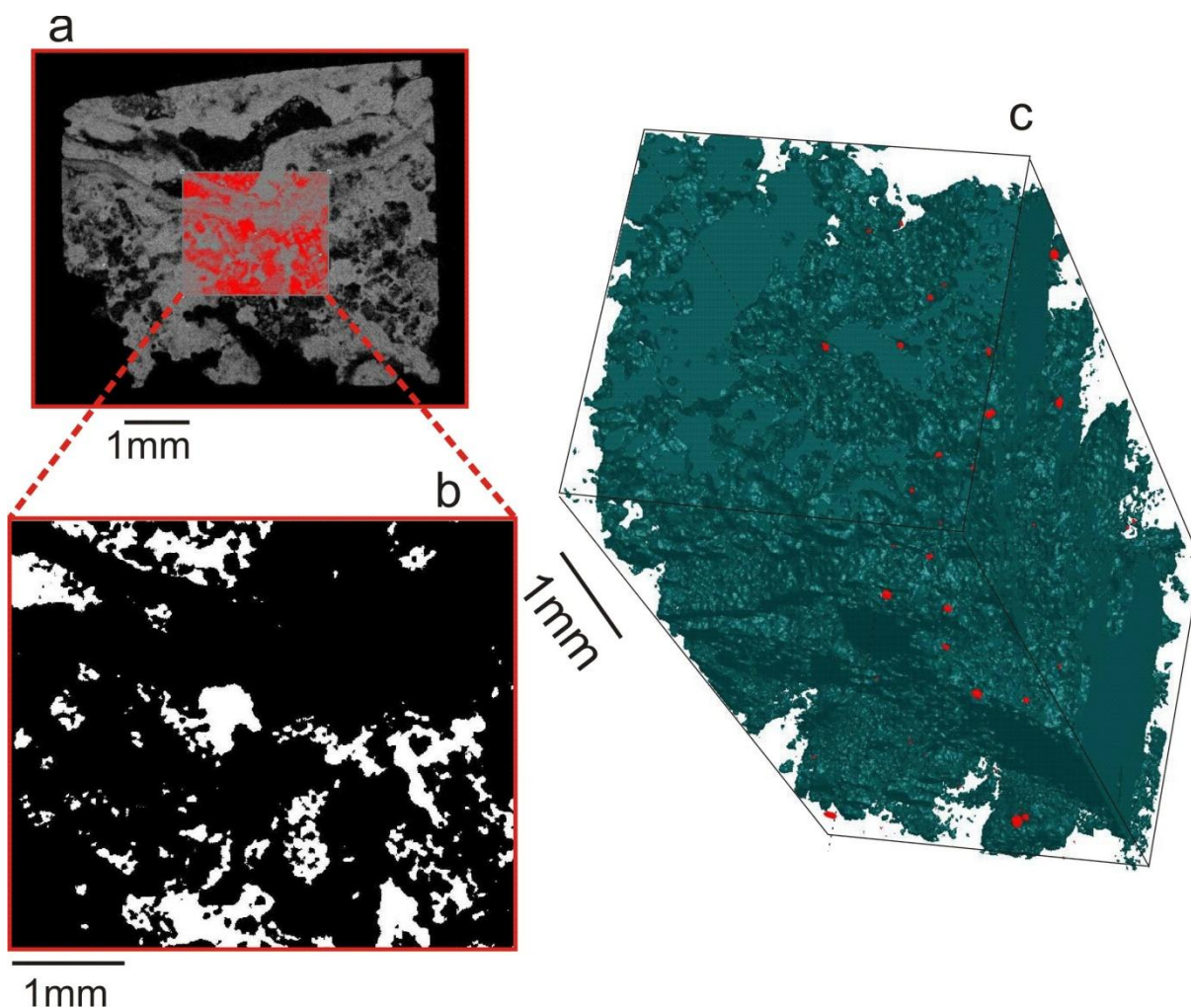


FIGURA 55 - Resultados qualitativos dos poros da amostra C2-1 (a) imagem microtomográfica com o ROI em vermelho. (b) seção selecionada binarizada. (c) poros da área selecionada reconstruído em 3D (poro-azul; pirita- vermelha).

O volume de porosidade absoluta encontrada é de 31,97% ($84,35 \text{ mm}^3$), sendo que praticamente toda a porosidade tem conectividade, cerca de 31,23% ($83,00 \text{ mm}^3$), e somente 0,74% ($1,35 \text{ mm}^3$) são de poros sem conectividade (TABELA 4).

TABELA 4 - RESULTADOS DAS ANALISES DOS VOLUMES SELECIONADOS DA CAMADA INTERMEDIARIA (C2)

Amostras	C2-1	C2-2
Total de seções de micro-CT	1335	1330
Tamanho do pixel	9,67 μm	10,44 μm
Volume total	264,64 mm^3	216,34 mm^3
Volume de rocha	68,01% (181,31 mm^3)	64,19% (139,19 mm^3)
Volume de material denso	0,02% (0,07 mm^3)	0,38% (0,83 mm^3)
Volume de porosidade total	31,97% (84,35 mm^3)	35,43% (76,32 mm^3)
Volume de poros conectados	31,23% (83,00 mm^3)	35,04% (75,77 mm^3)
Volume de poros isolados	0,74% (1,35 mm^3)	0,39% (0,55 mm^3)

A FIGURA 56 representa a distribuição média de tamanho de poros sendo que se tem um pico de aproximadamente 34% de poros com raio que vão de 10-100 μm .

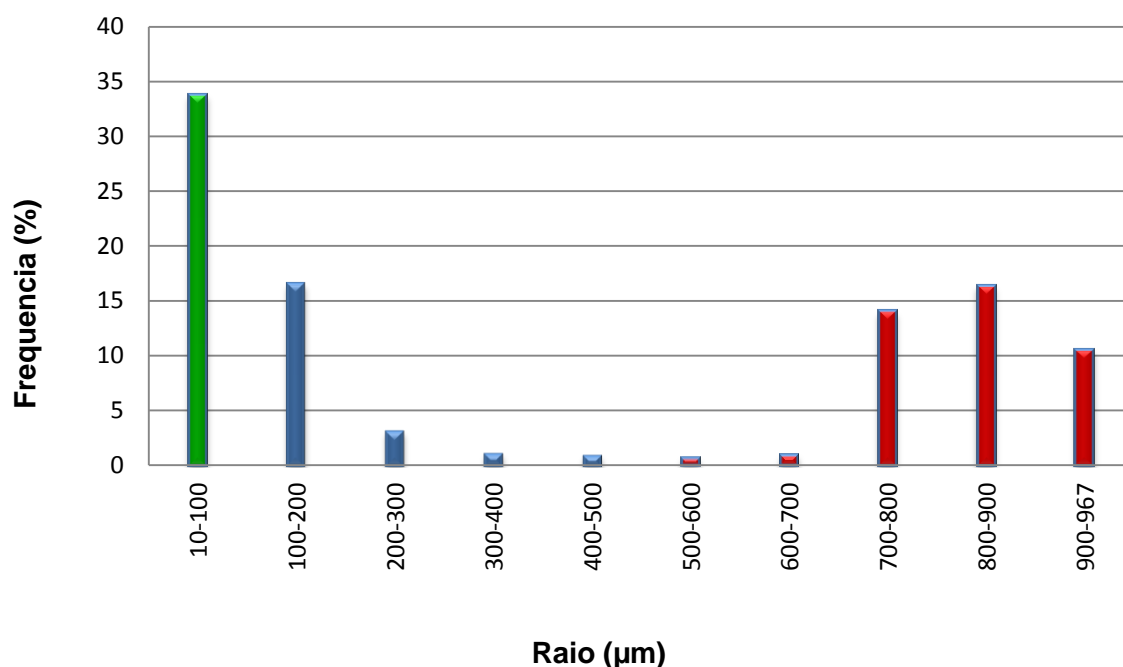


FIGURA 56 – Distribuição média de tamanho de poros bidimensional da amostra C2-1 (azul - abaixo que 500 μm ; vermelho – acima de 500 μm ; verde - maior frequência).

A amostra C2-2 possui dimensões de 1,0 cm x 1,4 cm x 2,0 cm e está localizada na subcamada C3b (FIGURA 57d). O tempo de aquisição foi de duas horas e cinquenta e sete minutos, com uma resolução de 10,44 μm e o total de seções microtomográficas é 1330. Os parâmetros físicos são: tensão de 70KV, corrente de 140 μA , filtro de alumínio e cobre. A radiação que conseguiu ultrapassar a amostra foi 41,8% da radiação total.

O volume selecionado para ser estudado é de 265,74 mm^3 , sendo que o volume de rocha é 139, 19 mm^3 (64,19%) e de material denso é 0,55 mm^3 (0,39%). A porosidade absoluta quantificada é de 35,43% (76,32 mm^3), sendo que praticamente toda a porosidade é conectada, tendo uma porosidade efetiva de 35,04% (75,77 mm^3) e apenas 0,39% (0,55 mm^3) de poros isolados (TABELA 4).

A FIGURA 57 ilustra a amostra que foi analisada e o local onde ocorreu reconstrução tridimensional (FIGURA 57b), sendo que a rocha está representada em cinza, o poro em azul e material denso em vermelho. É possível visualizar como os poros variam em suas formas e tamanho (FIGURA 57c).

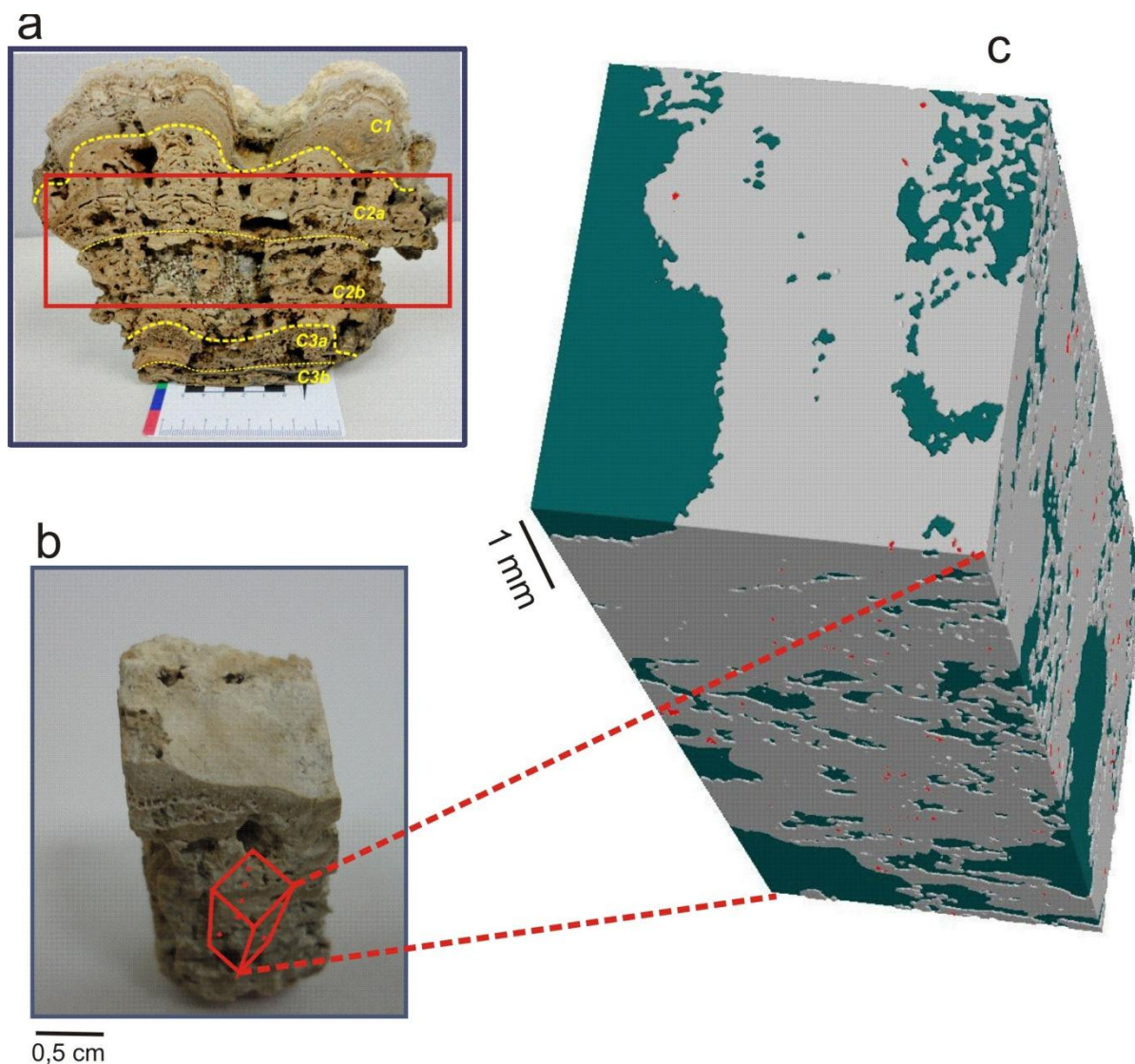


FIGURA 57 – Resultados qualitativos do volume selecionado da amostra C2-2. (a) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada. (b) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada. (c) parte selecionada da amostra reconstruída em 3D (poro – azul; rocha – cinza; pirita – vermelha).

A representação qualitativa está expressa na FIGURA 58, o qual se tem um corte microtomográfico (FIGURA 58a). A seção binarizada está representada pela FIGURA 58b, onde os poros estão em brancos e a rocha em preto. A FIGURA 58c ilustra um corte microtomográfico com presença de gastrópode indicado pela seta em vermelho.

Apresenta uma alta porosidade, ocorrendo porosidade fenestral, pois os poros são alongados e direcionados. Os poros variam de tamanho, e estão conectados por poros menores. Visualizou-se também porosidade vulgar e

cavernas, interpartícula e intrapartícula. A FIGURA 58d ilustra em azul os poros reconstruídos em três dimensões e em vermelho a presença de pirita, pode-se verificar como os poros estão distribuídos ao longo da amostra.

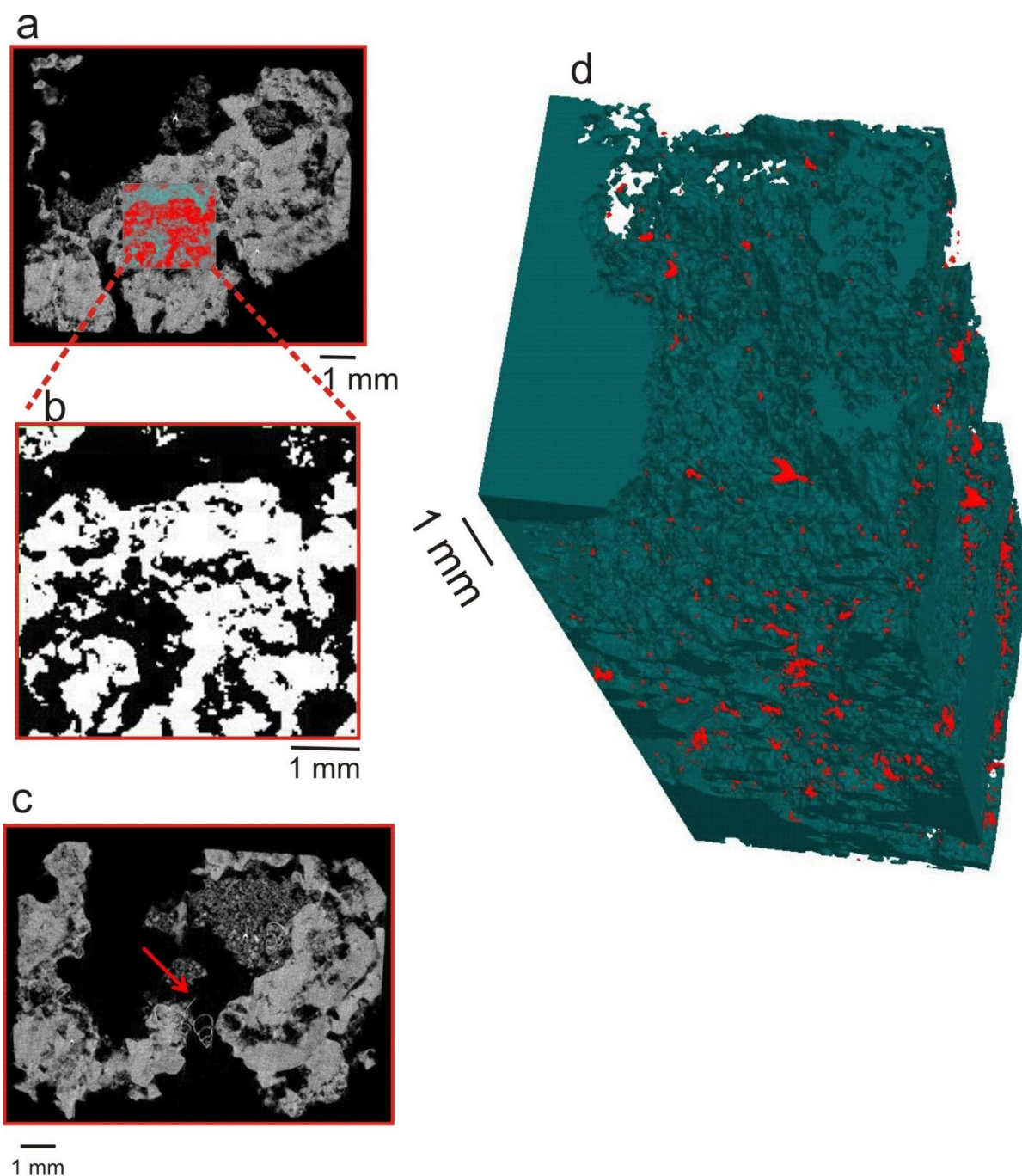


FIGURA 58 - Resultados qualitativos dos poros da amostra C2-2 (a) imagem microtomográfica com o ROI em vermelho. (b) seção selecionada binarizada. (c) imagem tomográfica, presença de porosidade intrapartícula dentro da carapaça do gastrópode (seta) e porosidade interpartícula. (d) poros da área selecionada reconstruído em 3D (poro-azul; pirita-vermelha).

Na amostra C2-2 percebe-se certa homogeneidade da distribuição de tamanho de poros (FIGURA 59). Sendo que se tem um pico de aproximadamente 26% de frequência de poros que tem um raio que está num intervalo de 300-350 μm .

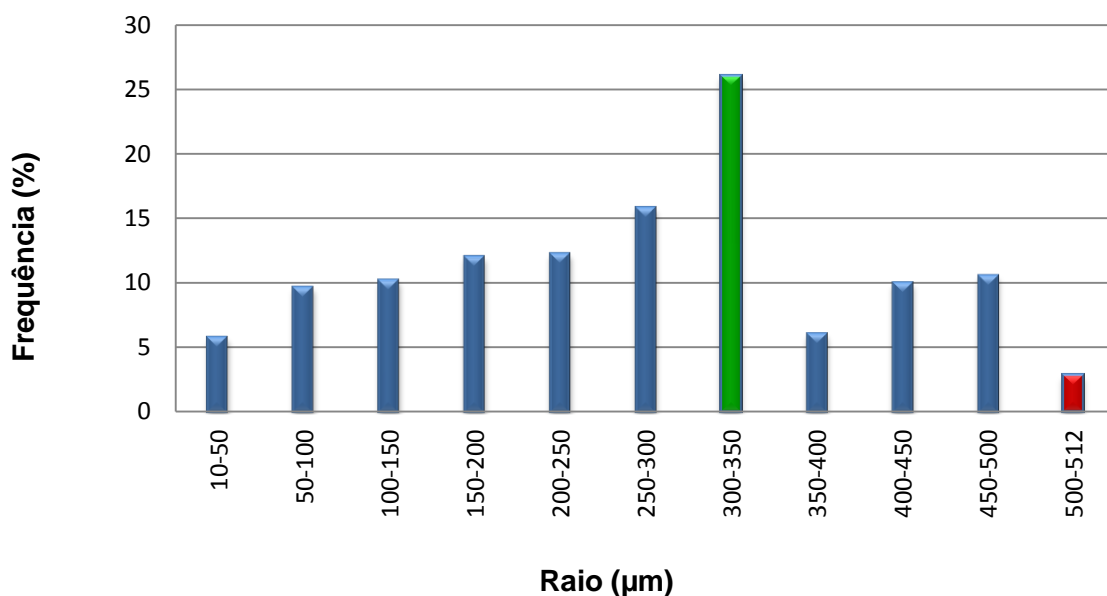


FIGURA 59 – Distribuição média de tamanho de poros bidimensional da amostra C2-2 (azul - abaixo que 500 μm ; vermelho – acima de 500 μm ; verde - maior frequência).

Na camada intermediária os três pontos analisados apresentaram uma grande variação na mineralogia. Em C2a-1 (FIGURA 61 e FIGURA 60) encontrou-se grande quantidade de calcita magnesiana (cerca de 83%) e quartzo (17%).

À medida que coexistam nas amostras, diversos minerais diferentes, a complexidade das estruturas aumenta, sendo necessária a identificação de minerais em pequena quantidade, à intervenção e conhecimento do operador se torna mais importante.

A amostra C2a-1 apresentou-se apenas calcita magnesiana (83%) e quartzo (17%). Enquanto a amostra C2a-2 (FIGURA 61 e FIGURA 60) aparece outros minerais além da calcita magnesiana (39%) e quartzo (31%), como a pirita (6%) e a aragonita (13%); é o único local do estromatólito que constatou calcita (11%).

Em C2b-3 (FIGURA 61 e FIGURA 60), a calcita magnesiana reduz para 20%, com 27%o quartzo e 12% a aragonita. Ocorreu um mineral pouco conhecido e raro do grupo das dolomitais, denominado kutnohorita ($\text{Ca}(\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Fe})(\text{CO}_3)_2$) com 42%). A TABELA 5 expõe os valores quantitativos dos minerais encontrados nas três amostras analisadas.

TABELA 5 - MINERAIS IDENTIFICADOS NA DRX DA C2

MINERAIS	C2a-1	C2a-2	C2b-3
Calcita Magnesiana	83%	39%	20%
Quartzo	17%	31%	27%
Pirita	-	6%	-
Aragonita	-	13%	12%
Calcita	-	11%	-
Kutnohorita	-	-	42%

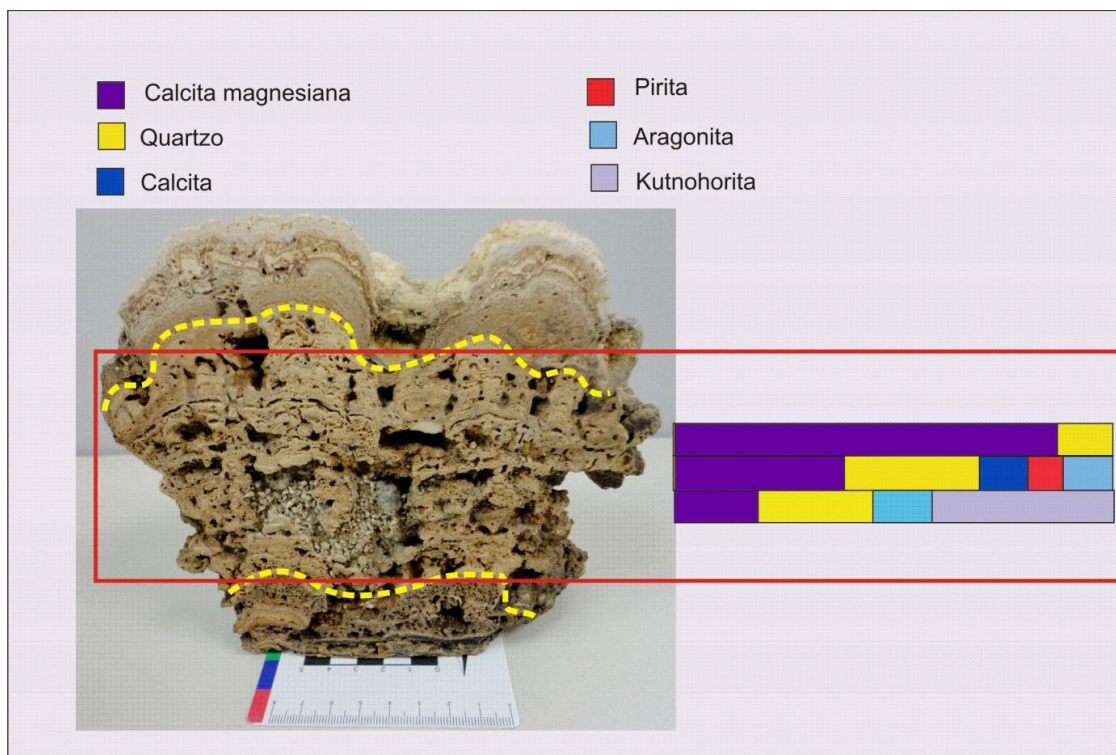


FIGURA 60 - Resultados da DRX de C2, ressaltando os principais minerais encontrados.

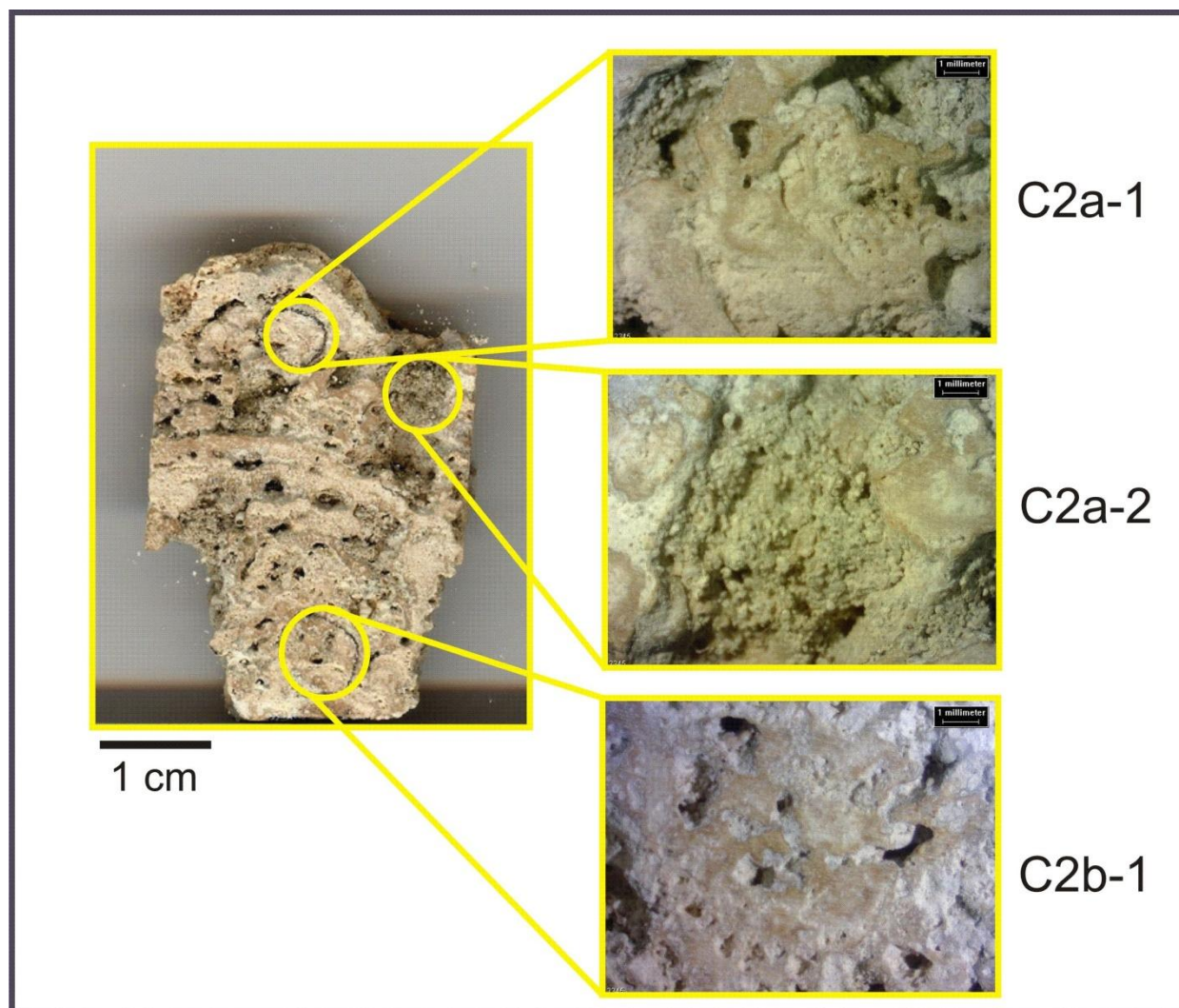


FIGURA 61 - Local onde foram coletadas amostras para análise mineralógica.

5.3 CAMADA SUPERIOR (C1)

A camada superior apresenta-se com uma coloração que varia entre marrom claro a escuro. Sua estrutura é composta por esteiras lisas, finas, contínuas e crenuladas, com espessura de aproximadamente 3,0 cm (FIGURA 30). Possuem poros alveolares, podendo ter sido causado pela presença de gastrópodes, gerando porosidade vugular e intrapartícula (FIGURA 62- seta azul). Encontra-se porosidade tipo caverna (FIGURA 62 - seta vermelha). Também pode-se observar poros do tipo boring (FIGURA 62 - seta verde), e porosidade fenestral interlaminação (FIGURA 62- seta amarela). A morfologia dos poros varia de arredondado, na sua maioria (FIGURA 62 – seta azul e verde), e alguns alongados, esses estão na vertical (FIGURA 62 - seta vermelha).



FIGURA 62 - Camada superior do estromatólito. Seta verde: porosidade causada por bioturbação boring. Seta azul: porosidade vugular e intrapartícula. Seta vermelha: porosidade caverna. Seta amarela: porosidade fenestral.

Com a análise petrográfica verificou-se que C1 possui baixa porosidade, comparada com as outras camadas. Apresenta laminação crenulada e ondulada com algumas estruturas peloidais.

Assim como caracterizado no trabalho de Lemos (1996) encontrou-se laminação crenulada, alternadas entre lamelas de matéria orgânica e as lamelas carbonática com fibras radiais (FIGURA 63 b e c e FIGURA 64a,b e d). Para verificar essa presença de matéria orgânica foi feito uma análise de microscopia eletrônica de varredura em duas laminas petrográficas, que apresentou uma maior concentração desse material de coloração amarelo escuro, que poderia ser matéria orgânica ou fosfato. Foram realizadas análises pontuais e de varredura, encontrando um alto teor de carbono, comprovando a presença de matéria orgânica (FIGURA 66 e FIGURA 67).

Foi encontrada ainda, Presença de porosidade fenestral, vugular, intrapartícula, interpartícula e móldica (FIGURA 63a, b e c; FIGURA 64a, b e c, e FIGURA 65a). Sendo que a porosidade móldica foi criada pela dissolução da carapaça de bioclitos (FIGURA 63c - seta vermelha; FIGURA 64c - seta verde), enquanto a porosidade fenestral se formou entre as laminações (FIGURA 63a; FIGURA 64a e b; FIGURA 65a).

A camada C1 é composta predominantemente por lama micrítica, com presença de grãos detríticos (quartzo), mal selecionados, em pequena quantidade nessa camada (FIGURA 64d e FIGURA 65a e d).

Verificou-se a presença de gastrópode, que contribuem na formação da porosidade intrapartícula (FIGURA 65c), bivalves (FIGURA 64c e FIGURA 65d (indicado pela seta rosa)) e ostracodes (FIGURA 64d (indicado pela seta amarela)).

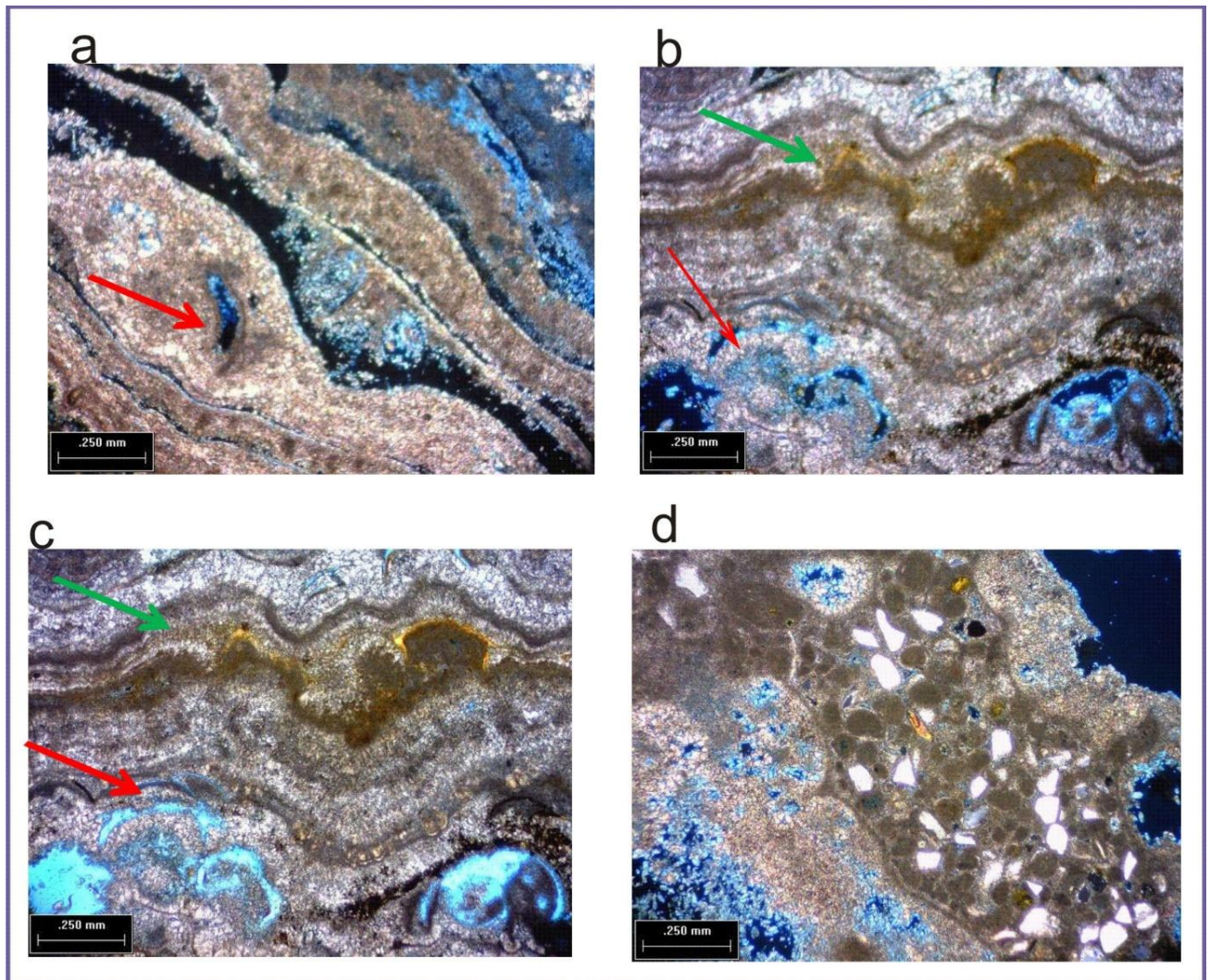


FIGURA 63 - Fotomicrografia da camada C1 (a) porosidade fenestral e móldica (seta em vermelho); (b) porosidade fenestral e móldica (seta em vermelho), laminação crenulada alternada por lamelas de matéria orgânica e lamelas de carbonato com fibras radiais (mais claras) (seta em verde); (c) porosidade fenestral e móldica (seta em vermelho), laminação crenulada alternada por lamelas de matéria orgânica e lamelas com fibras radiais (mais claras) (seta em verde); (d) porosidade vugular e cavernas, presença de grãos de quartzo.

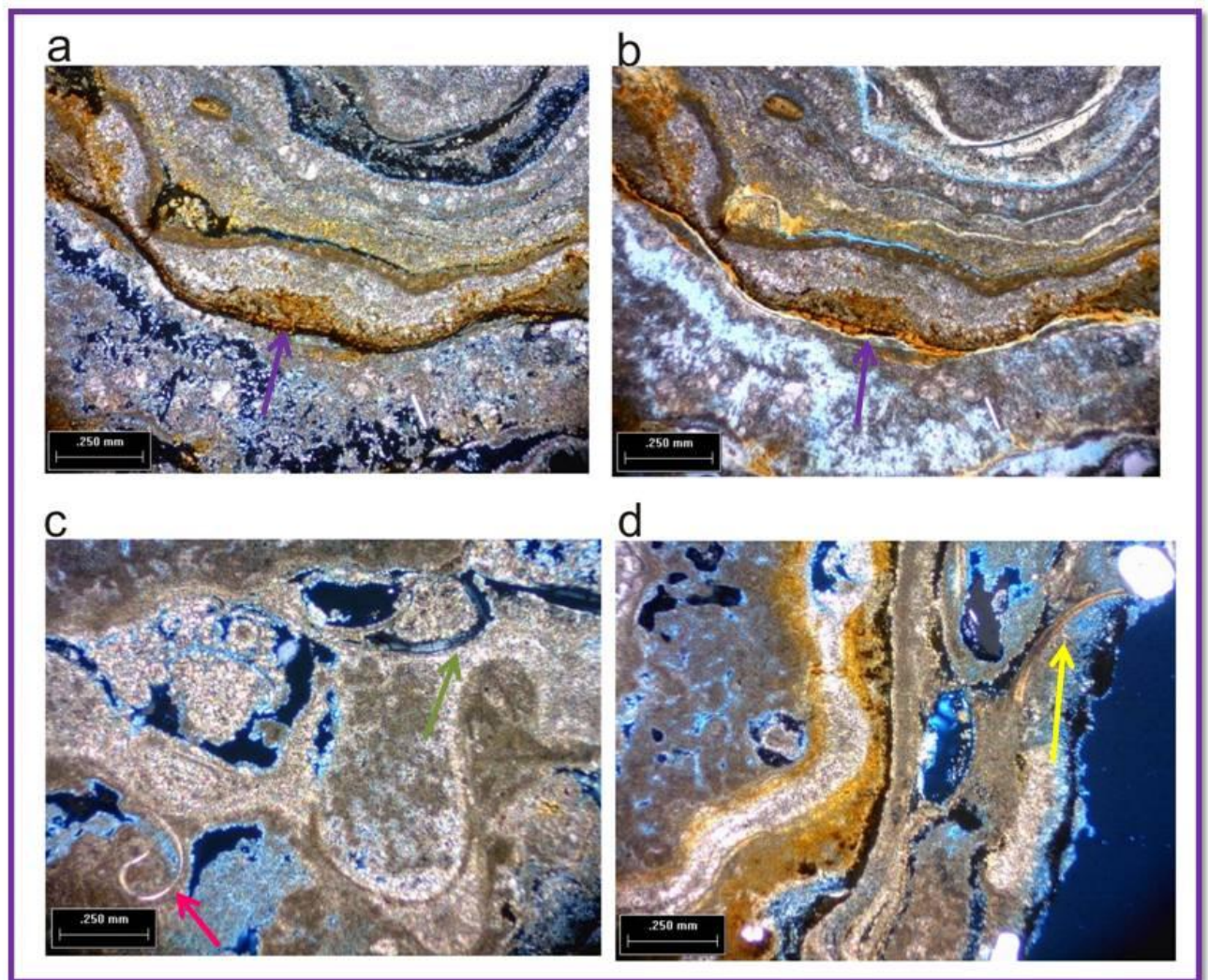


FIGURA 64 - Fotomicrografia da camada C1 (a) porosidade fenestral e vugular; concentração de matéria orgânica (seta roxa) (NX). (b) a mesma imagem em NP. (c) porosidade vugular e móldica (seta verde); bivalve (seta rosa); (d) porosidade fenestral e vugular; ostracodes (seta amarela).

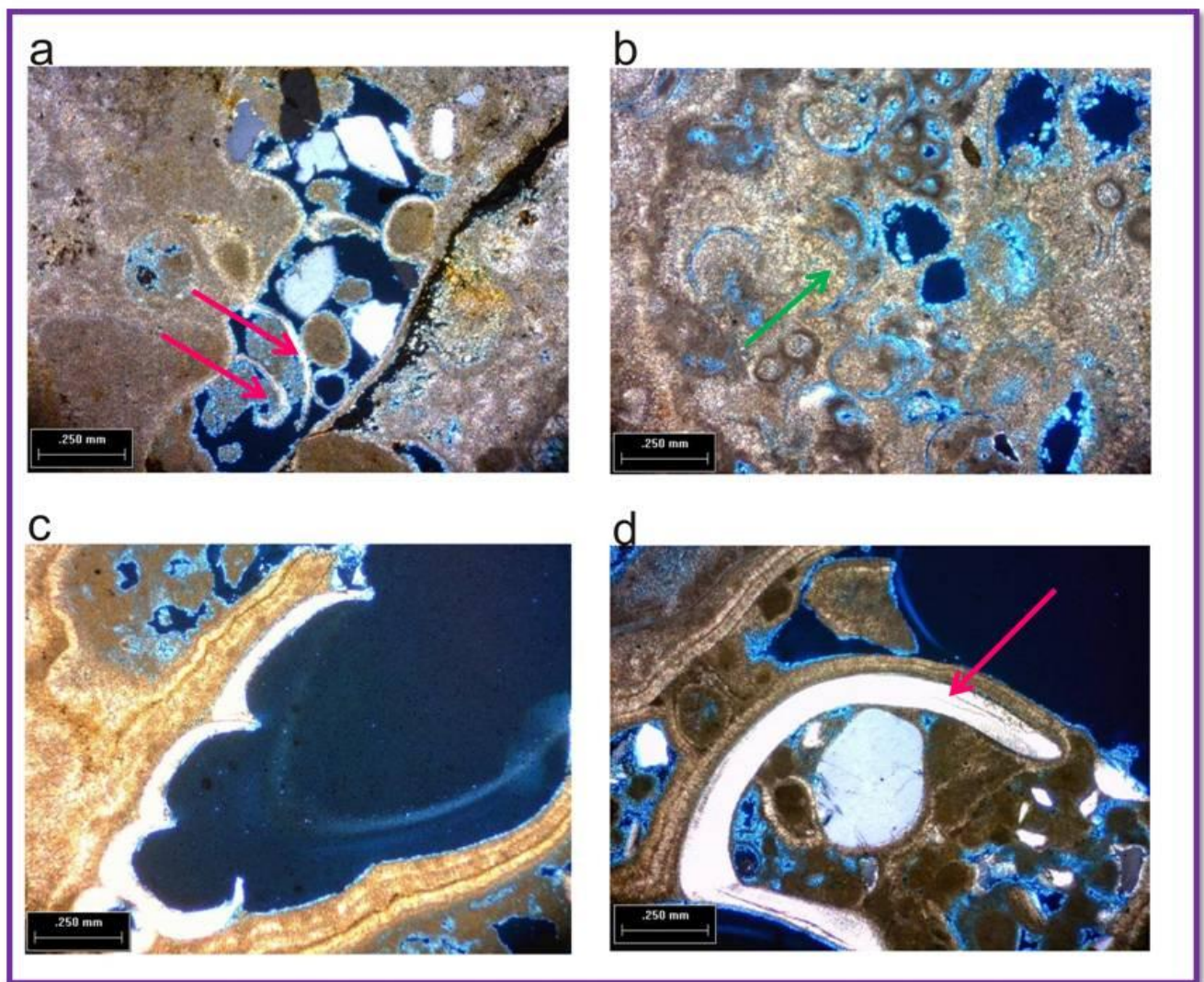


FIGURA 65 – Fotomicrografia da camada C1 (a) porosidade interpartícula, intrapartícula, fenestral; bivalve (setas rosa). (b) porosidade móldica e vugular. (c) porosidade intrapartícula dentro da carapaça do gastrópode. (d) porosidade vugular e interpartícula; bivalve (seta rosa).

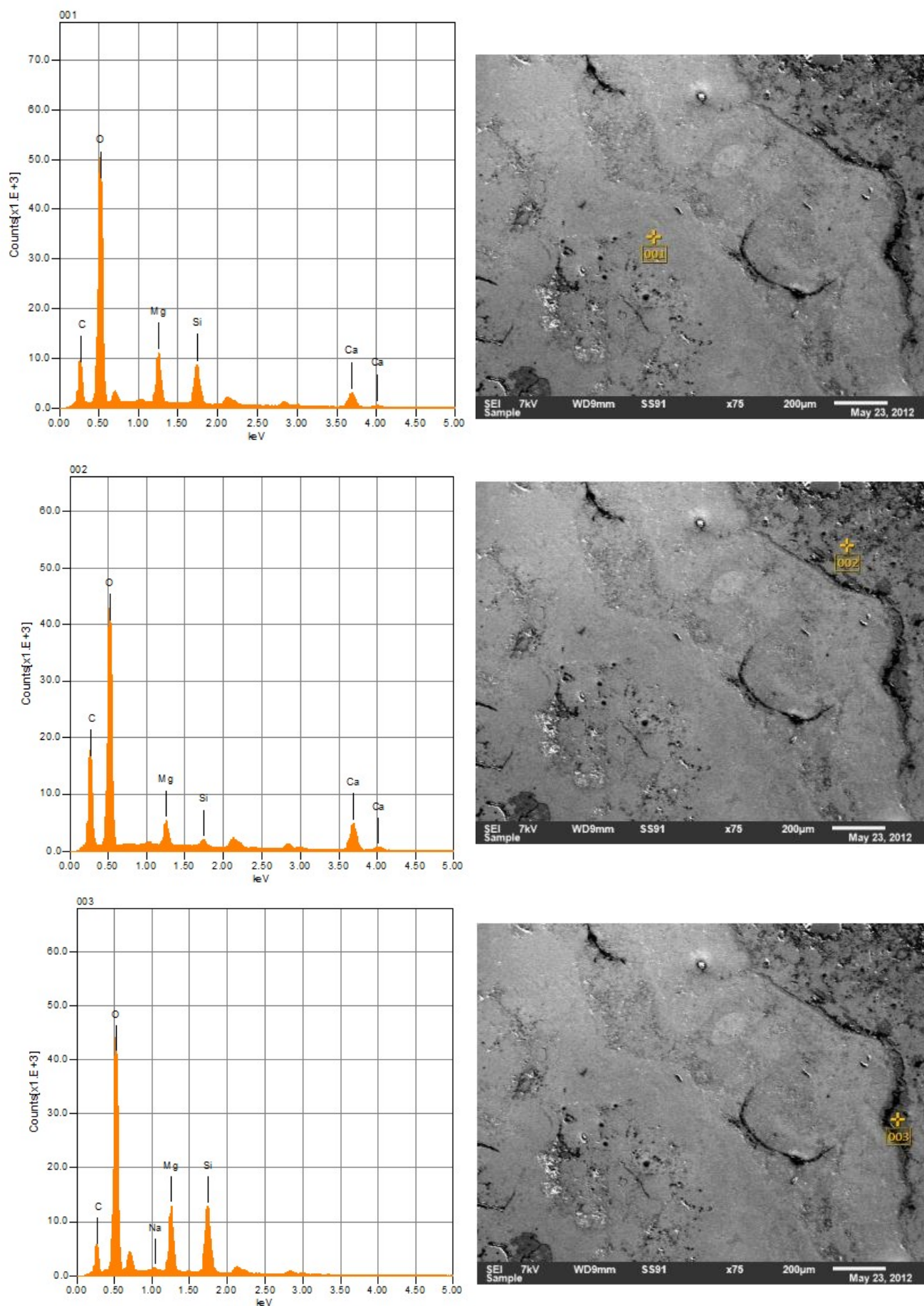


FIGURA 66 – Resultado da análise pontual, espectros gerados por EDS (à esquerda) e imagens do MEV (à direita).

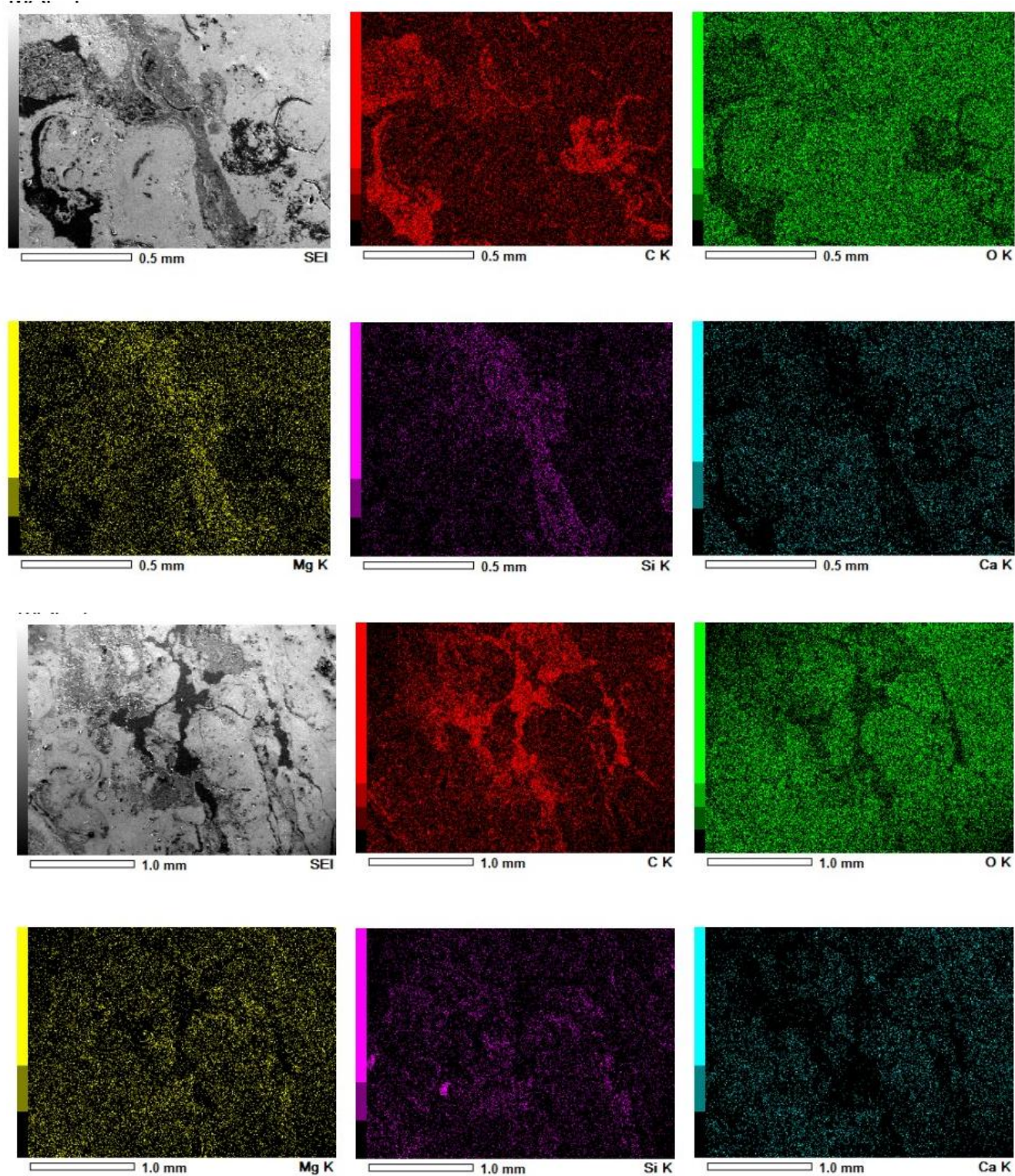


FIGURA 67 - Mapeamento para verificar os elementos químicos nas duas amostras analisada.

A camada C1 tem o menor percentual médio de porosidade, sendo que 16,6% de porosidade absoluta, 14,4% de porosidade efetiva e 1,3% de porosidade

sem conectividade. Esta é a camada mais laminada comparada a C2 e C3. Os tipos de poros com maior frequência são os fenestrais, devido à laminação, e maioria dos poros são alongados.

Nessa camada foram retiradas três amostras para serem analisadas na microtomografia: C1-1, C1-2 e C1-3. Sendo uma amostra (C1-3) foi utilizada para análise de porosimetria por injeção de mercúrio.

A amostra C1-1 com dimensões 1,3 cm x 1,3 cm x 1,0 cm (FIGURA 68b). A resolução máxima alcançada foi de 9,6 μm , com um tempo de aquisição de uma hora e trinta e nove minutos. Os parâmetros físicos utilizados para obtenção dos dados tomográficos foram: tensão 70 KV e corrente de 140 μA e o filtro utilizado foram de alumínio e cobre. A quantidade de radiação que atravessou a amostra foi de 35,7% da radiação total. Essa amostra foi a que apresentou menor porosidade, sendo que 7,7% de porosidade absoluta, 6,26% de porosidade efetiva e 1,44% de poros isolados (TABELA 6).

A FIGURA 68 corresponde a um esquema dos resultados qualitativos da amostra C1-1, o qual a FIGURA 68b representa a amostra analisada com área de reconstrução demarcada pelo cubo em vermelho. A FIGURA 68c ilustra o modelo tridimensional correspondente à área selecionada onde a rocha está representada em cinza e os poros em azul, através dessa imagem é possível verificar a presença de porosidade do tipo fenestral.

A FIGURA 69 ilustra os resultados qualitativos da amostra C1-1, o qual a FIGURA 69a representa uma das 1219 seções microtomográficas, com a área de interesse demarcada. A FIGURA 69b demonstra a binarização da área selecionada (ROI), onde os poros estão em preto, e a rocha em branco, e a FIGURA 69c ilustra os poros reconstruídos em três dimensões. Pelos resultados microtomográficos se pode tirar alguns dados sobre porosidade. Verificou-se a presença de porosidade fenestral e vugular, os poros são arredondados e menores comparados com as outras amostras. É a amostra que contém maior concentração de porosidade fenestral e que apresenta um menor percentual de porosidade total. Por meio da imagem tridimensional foi possível concluir que os poros menores estão ligando os poros maiores, produzindo uma porosidade conectada.

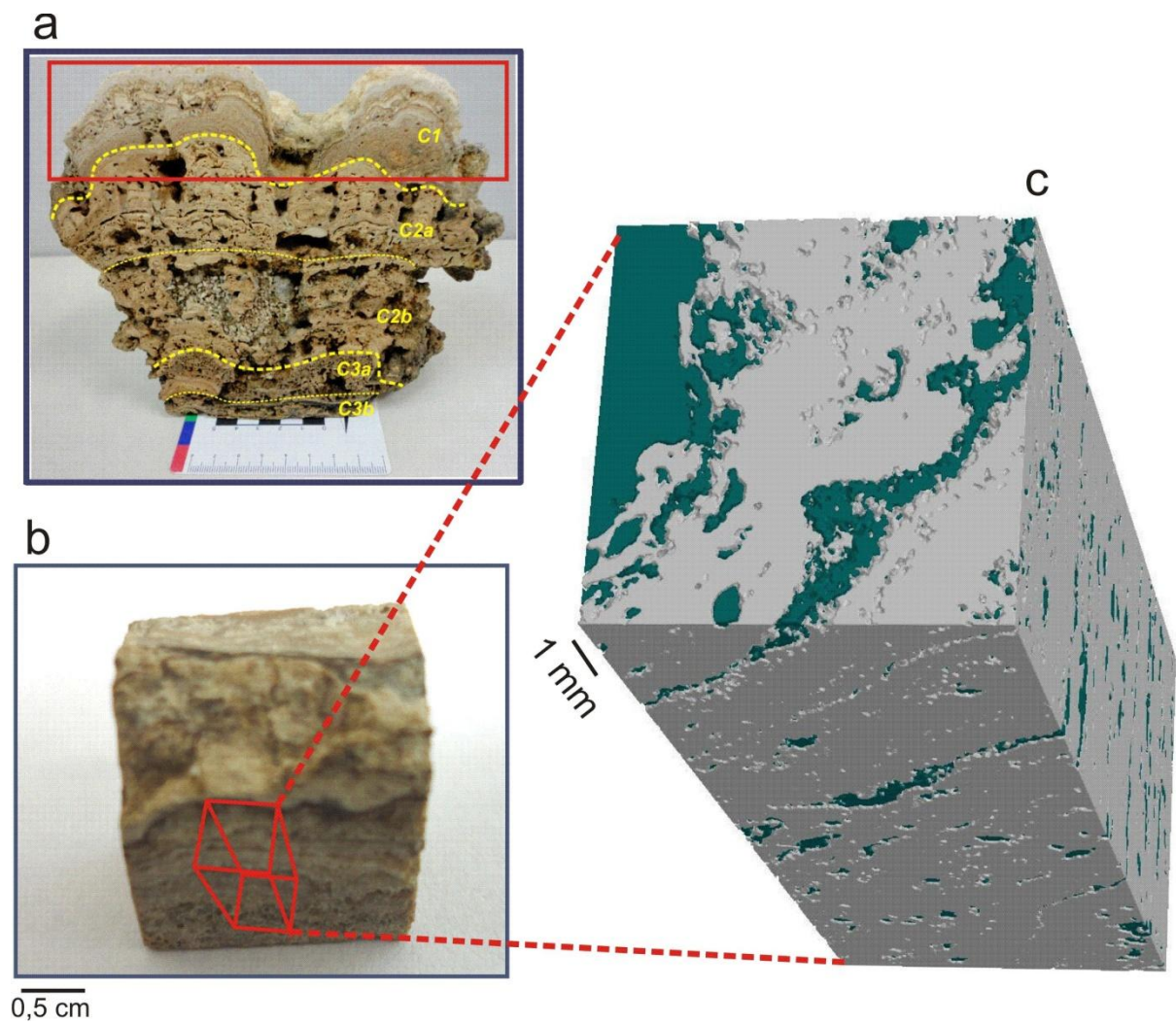


FIGURA 68 – Resultados qualitativos do volume selecionado da amostra C1-1. (a) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada. (b) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada. (c) parte selecionada da amostra reconstruída em 3D (poro – azul; rocha – cinza).

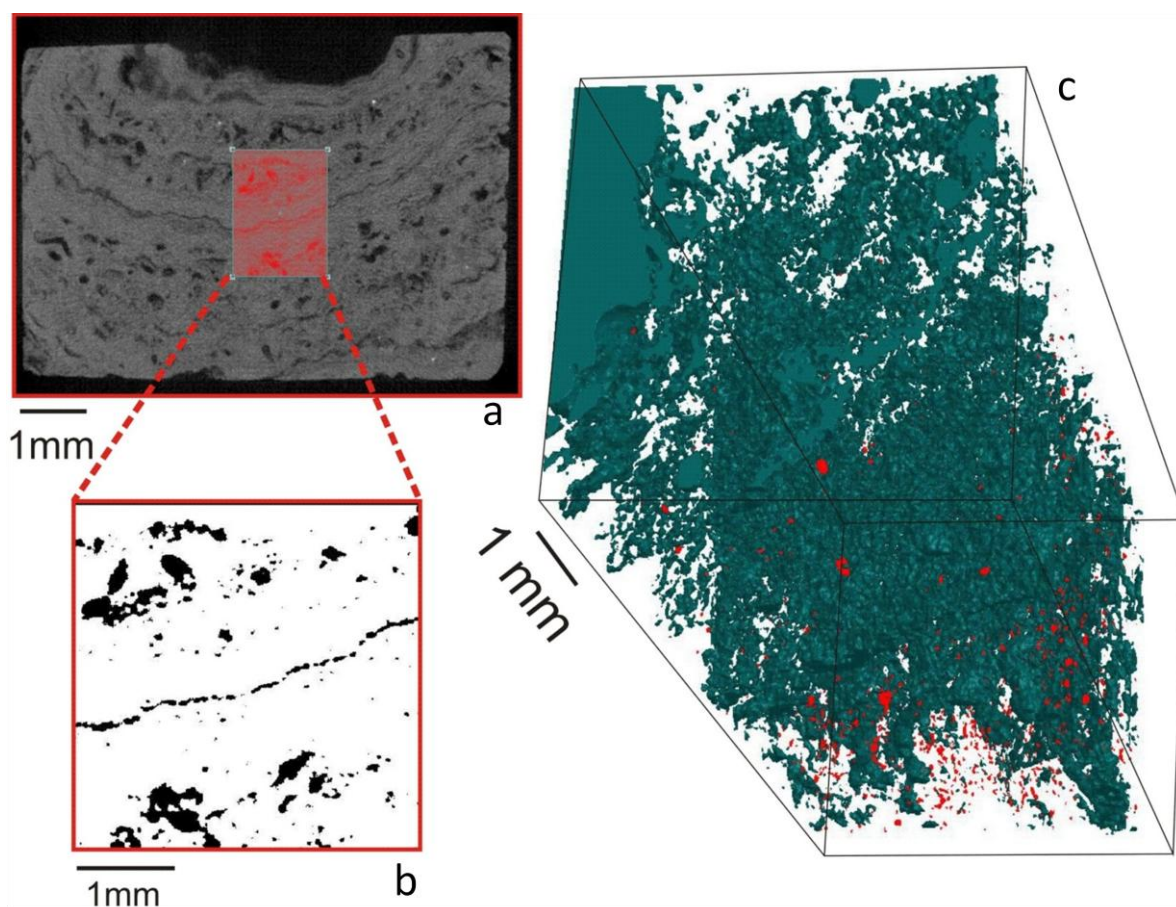


FIGURA 69 - Resultados qualitativos dos poros da amostra C1-1. (a) imagem microtomográfica com o ROI em vermelho. (b) seção selecionada binarizada. (c) poros da área selecionada reconstruído em 3D (poros - azul; pirita - vermelha).

TABELA 6 – QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME SELECIONADO NA CAMADA SUPERIOR (C1) DADO PELA MICRO-CT

AMOSTRAS	C1-1	C1-2	C1-3
Total de seções de micro-CT	1219	599	871
Tamanho do pixel	9,67 μ m	9,41 μ m	9,41 μ m
Volume total	154,29 mm ³	101,99 mm ³	139,89 mm ³
Volume de rocha	92,28% (142,52 mm ³)	80,27% (82,12 mm ³)	77,61% (108,89 mm ³)
Volume de material denso	0,02% (0,03 mm ³)	0,01% (0,01 mm ³)	0,05% (0,07 mm ³)
Volume de porosidade total	7,70% (11,74 mm ³)	19,72% (19,85 mm ³)	22,34% (30,93 mm ³)
Volume de poros conectados	6,26% (9,66 mm ³)	18,35% (18,71 mm ³)	21,23% (29,71 mm ³)
Volume de poros isolados	1,44% (2,08 mm ³)	1,37% (1,14 mm ³)	1,11% (1,22 mm ³)

A distribuição média dessa amostra pode ser visualizada na FIGURA 70, Podendo ser observado que se tem um pico de aproximadamente 45% de frequência de poros que estão no intervalo de 10-50 μm .

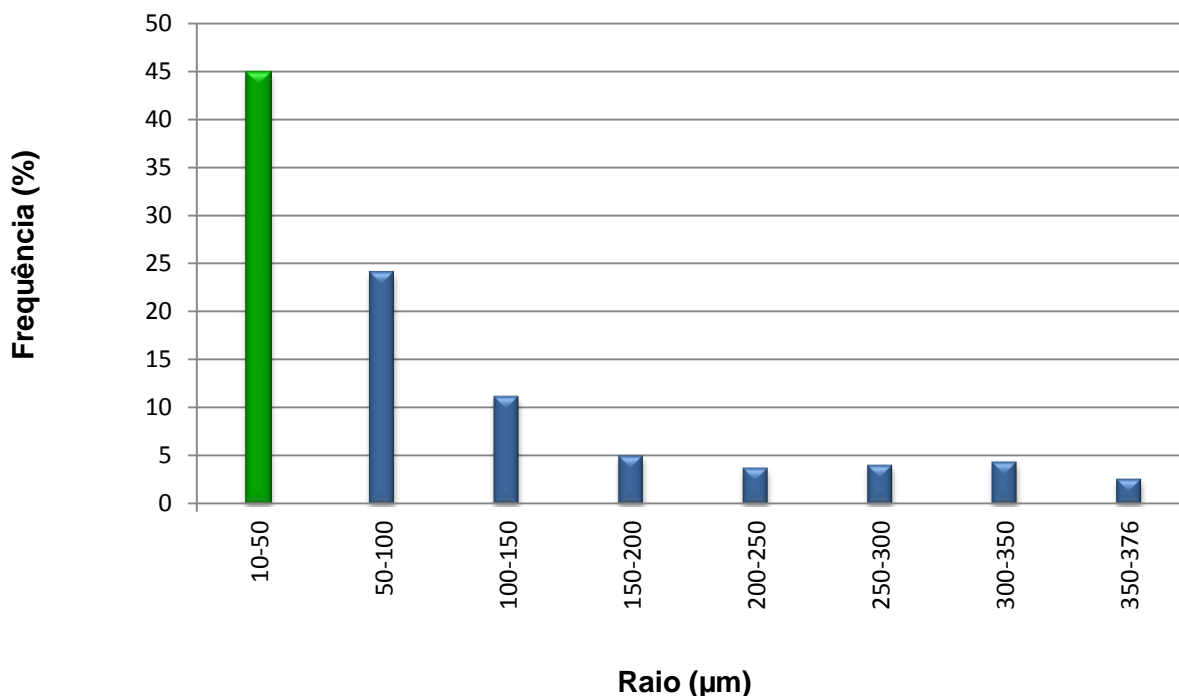


FIGURA 70 - Distribuição média de tamanho de poros bidimensional da amostra C1-1.

A FIGURA 71 ilustra os resultados qualitativos obtidos pela análise de microtomográfica. A amostra C1-2 tem dimensões 1,4 cm x 1,0 cm x 0,5 cm (FIGURA 71b). A resolução máxima obtida foi de 9,4 μm , levando um tempo de aquisição de uma hora e trinta e nove minutos. A radiação que conseguiu atravessar a amostra foi de 43,8% da radiação total. Os parâmetros físicos utilizados foram: tensão de 85 KV e corrente de 118 μA e o filtro de alumínio e cobre.

A FIGURA 71c ilustra o modelo tridimensional da amostra C1-3, que foi reconstruído somente área selecionada, sendo a rocha representada em cinza, os poros em azul. Através da reconstrução em três dimensões pode-se perceber que a amostra apresenta uma certa homogeneidade na forma e tamanho dos poros.

O volume selecionado para ser estudado foi de 101,99 mm³. O volume de rocha quantificado foi de 82,12 mm³ (80,27%) e uma quantidade muito pequena de pirita de 0,01 mm³ (0,01%).

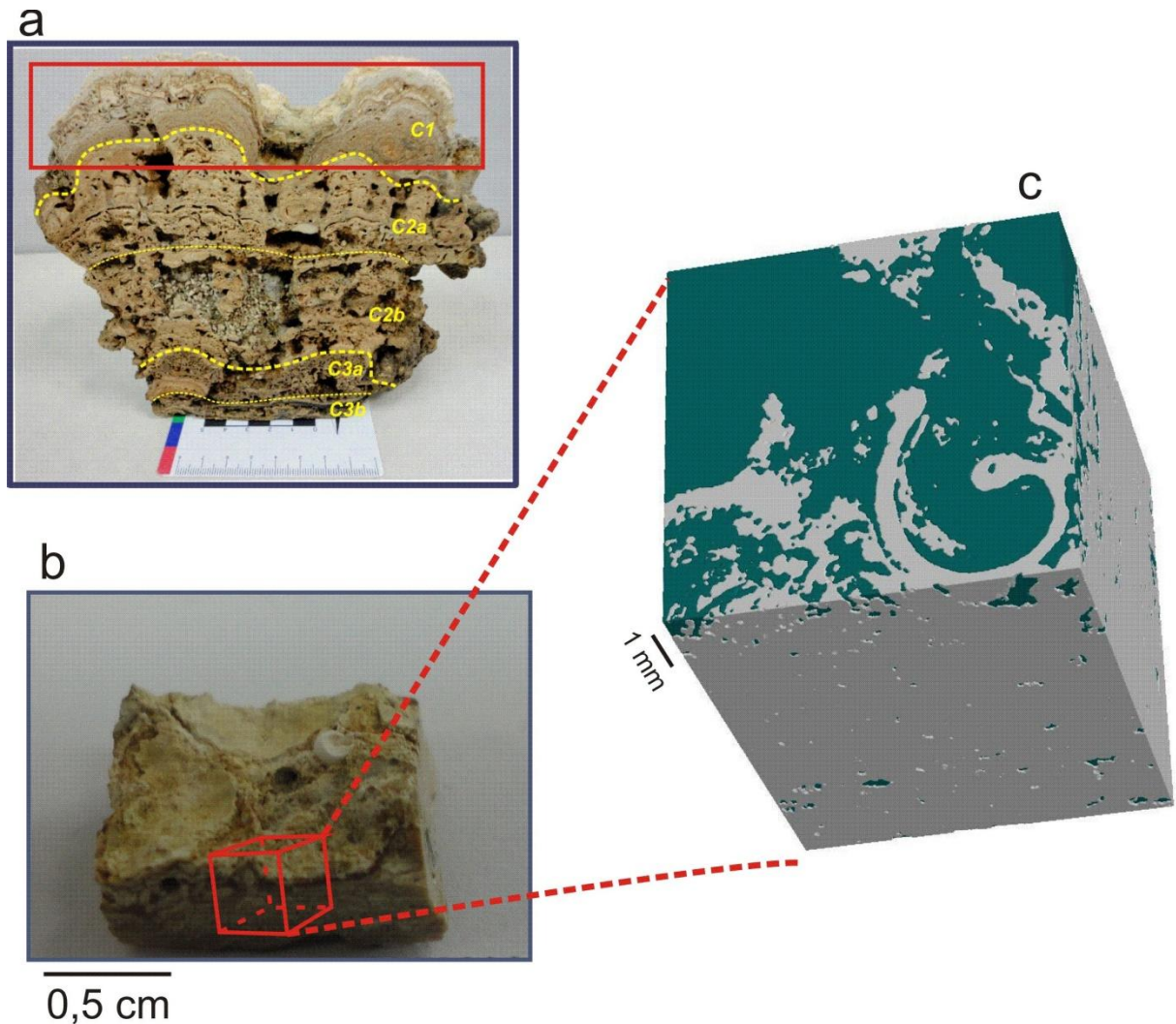


FIGURA 71 - Resultados qualitativos do volume selecionado da amostra C1-2. (a) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada. (b) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada. (c) parte selecionada da amostra reconstruída em 3D (poro – azul; rocha – cinza).

Indicado FIGURA 72a é uma das 599 seções microtomográficas com a área de interesse demarcada. A FIGURA 72b mostra a seção binarizada da área demarcada, onde os poros estão em branco e a rocha em preto. A FIGURA 72c é o modelo tridimensional dos poros.

A amostra C1-2 apresenta um aumento no percentual de porosidade comparada com a C1-1. A porosidade absoluta é de 19,72% ($19,85 \text{ mm}^3$), a porosidade efetiva foi de 18,35% ($18,71 \text{ mm}^3$) e a porosidade sem conectividade apenas 1,37% ($1,14 \text{ mm}^3$) (TABELA 6).

Visualiza-se através dos cortes microtomográficos e do modelo tridimensional a presença de porosidade fenestral e vugular, e pode-se verificar também que os poros maiores estão conectados através de poros menores (FIGURA 72b).

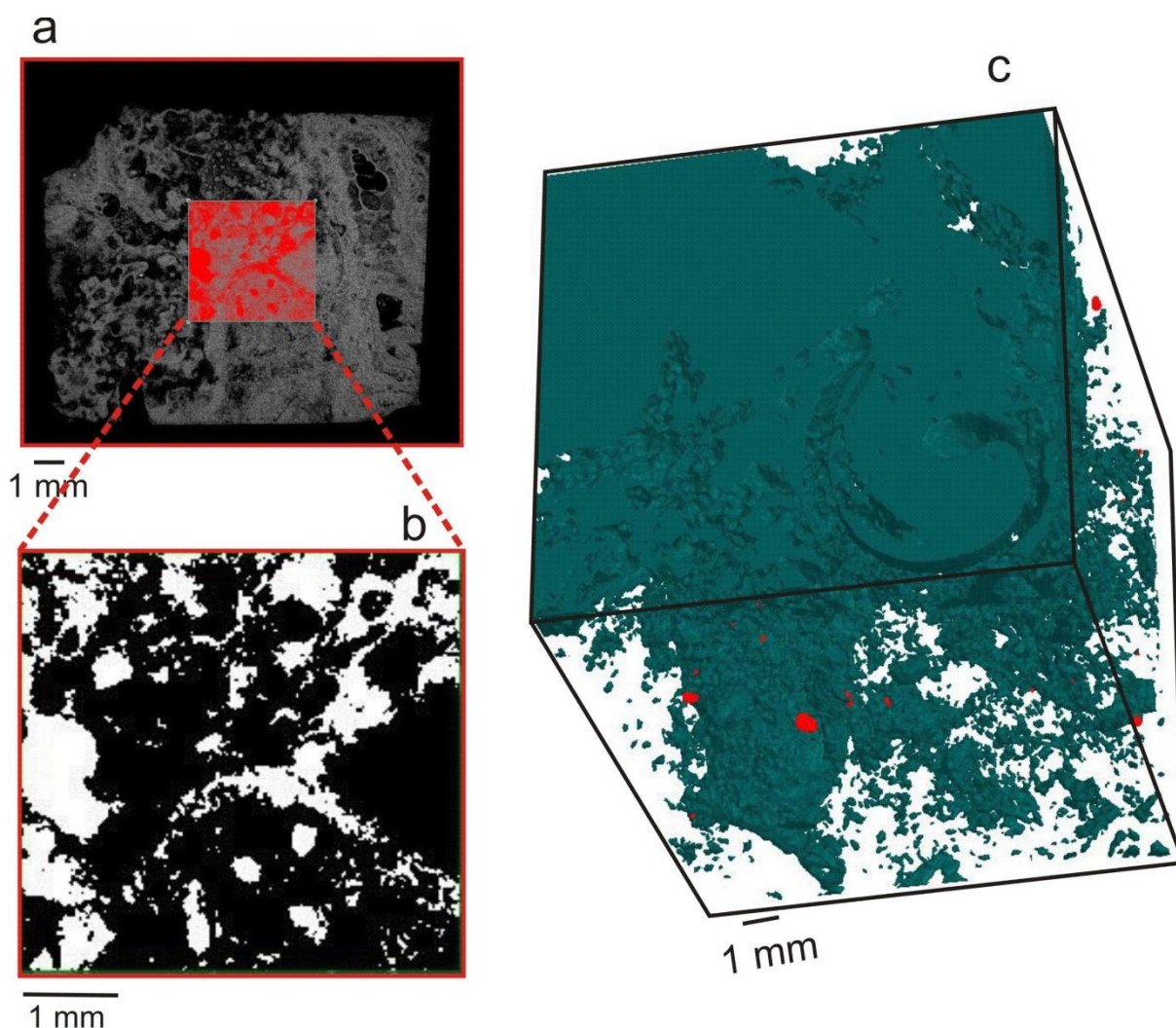


FIGURA 72 – Resultados qualitativos dos poros da amostra C1-2. (a) imagem microtomográfica com o ROI em vermelho. (b) seção selecionada binarizada. (c) poros da área selecionada reconstruído em 3D (poros - azul; pirita - vermelha).

A FIGURA 73 expressa a distribuição média de tamanho de poros encontrada através das análises feitas no IMAGO. Aproximadamente 40% dos poros tem frequência no intervalo de 10-50 μm .

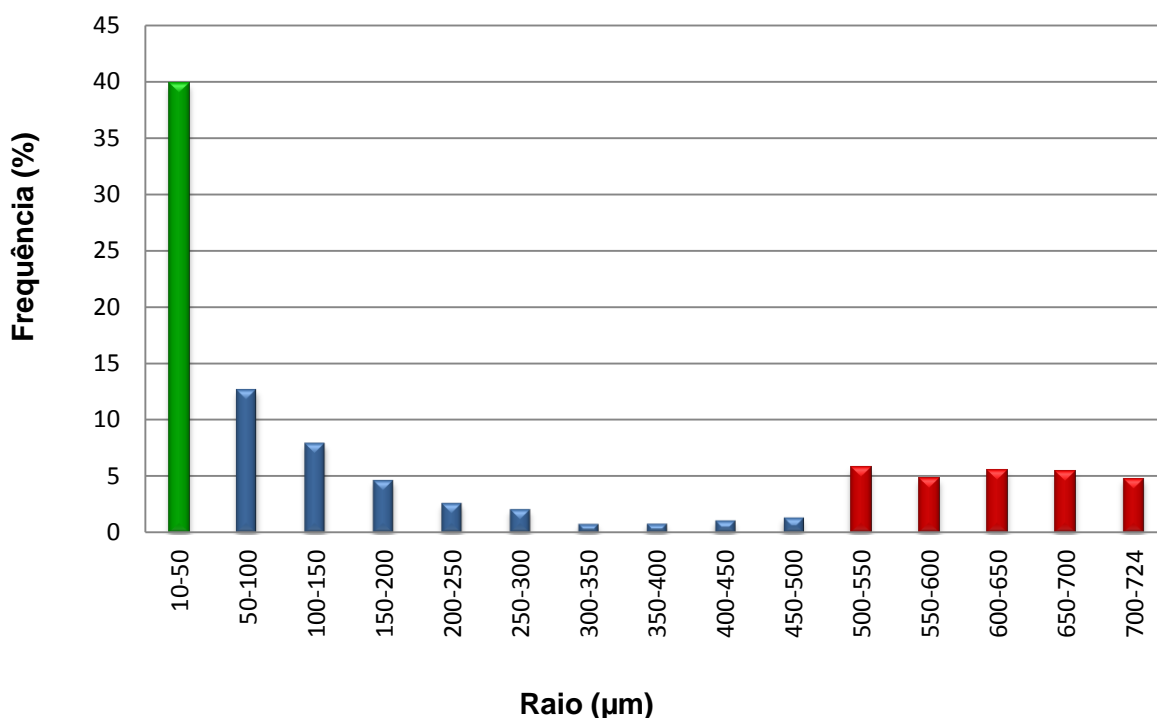


FIGURA 73 – Distribuição média de tamanho de poros bidimensional da amostra C1-2 (azul - abaixo que 500 μm ; vermelho – acima de 500 μm ; verde - maior frequência).

A amostra C1-3 tem dimensões de 1,3 cm x 1,1 cm x 0,7 cm (FIGURA 74b). A resolução utilizada para aquisição da imagem foi de 9,4 μm , com um tempo de uma hora e trinta e nove minutos. A quantidade de radiação que conseguiu atravessar o corpo é de 41,6%. Os parâmetros físicos foram: tensão de 100KV e corrente de 100 μA e filtro de alumínio e cobre.

A FIGURA 74c ilustra o modelo tridimensional da amostra C1-3, que foi reconstruído somente área selecionada, sendo a rocha representada em cinza, os poros em azul.

O volume selecionado é de 139,89 mm^3 , sendo que o volume de rocha é de 108,89 mm^3 (77,61%), correspondem à pirita é de 1,22 mm^3 (1,11%).

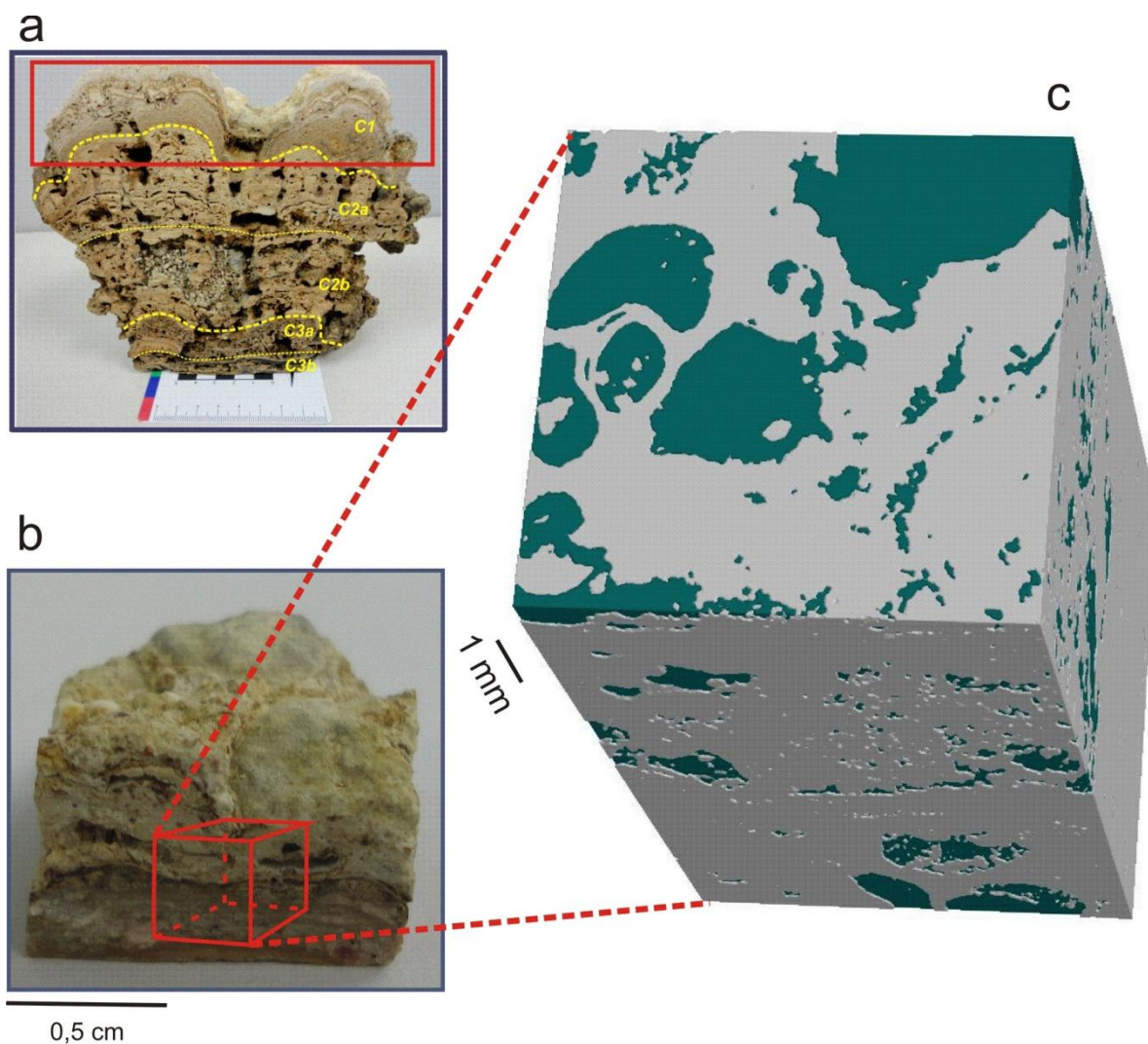


FIGURA 74 - Resultados qualitativos do volume selecionado da amostra C1-3. (a) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada. (b) fotografia da amostra com a camada de estudo selecionada. (c) parte selecionada da amostra reconstruída em 3D (poro – azul; rocha – cinza)

A FIGURA 75 apresenta os resultados quantitativos da amostra C1-3, tem-se uma seção microtomográfica com o ROI selecionado em vermelho (FIGURA 75a), um ROI binarizado, onde os poros estão em branco e a rocha em preto (FIGURA 75b) e imagem tridimensional dos poros (FIGURA 75c).

A porosidade em C1-3 é a maior encontrada nessa camada, tendo 21,23% ($29,71 \text{ mm}^3$) de porosidade com conectividade e 1,11% ($1,22 \text{ mm}^3$) de porosidade sem conectividade, totalizando um percentual de porosidade absoluta de

22,34% (TABELA 6). É possível visualizar uma variação no tamanho dos poros, sendo que, os poros maiores estão interconectados pelos menores.

Visualizou-se através das imagens microtomográficas uma variação no tamanho, tipologia e morfologia dos poros. Referente à tipologia observou porosidade tipo cavernas, vugular e alguns fenestrais. A morfologia mostra poros angulosos, arredondados e alguns alongados (FIGURA 75c).

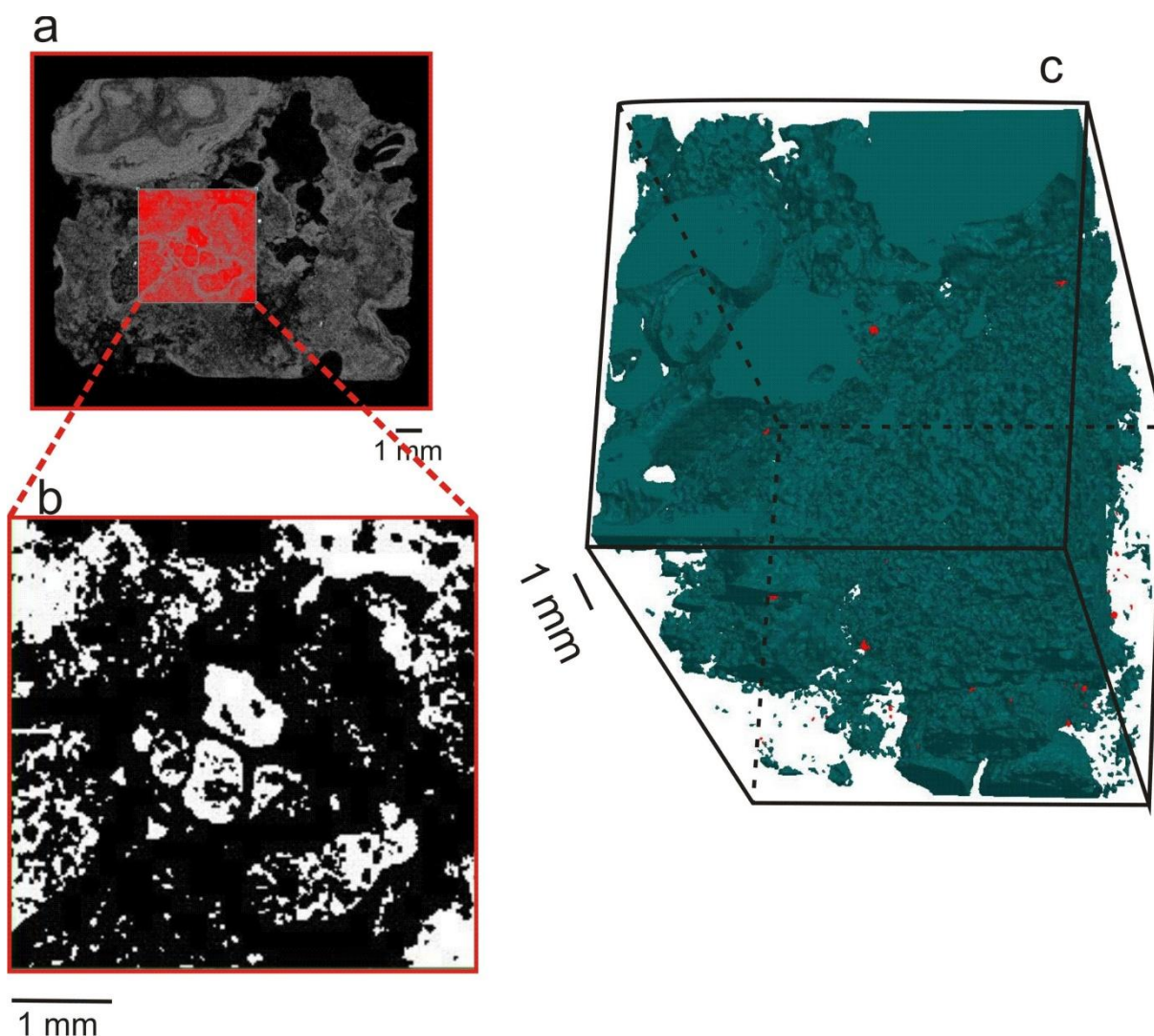


FIGURA 75 - Resultados qualitativos dos poros da amostra C1-3. (a) imagem microtomográfica com o roi em vermelho. (b) seção selecionada binarizada. (c) poros da área selecionada reconstruído em 3D(poros - azul; pirita - vermelha).

A distribuição média de tamanho de poros de C1-3 obtido pela técnica de microtomografia pode ser visualizada na FIGURA 76. Observa-se um pico de aproximadamente 40% de poros entre 10-100 μm e apresenta quase 8% de poros maiores de 500 μm .

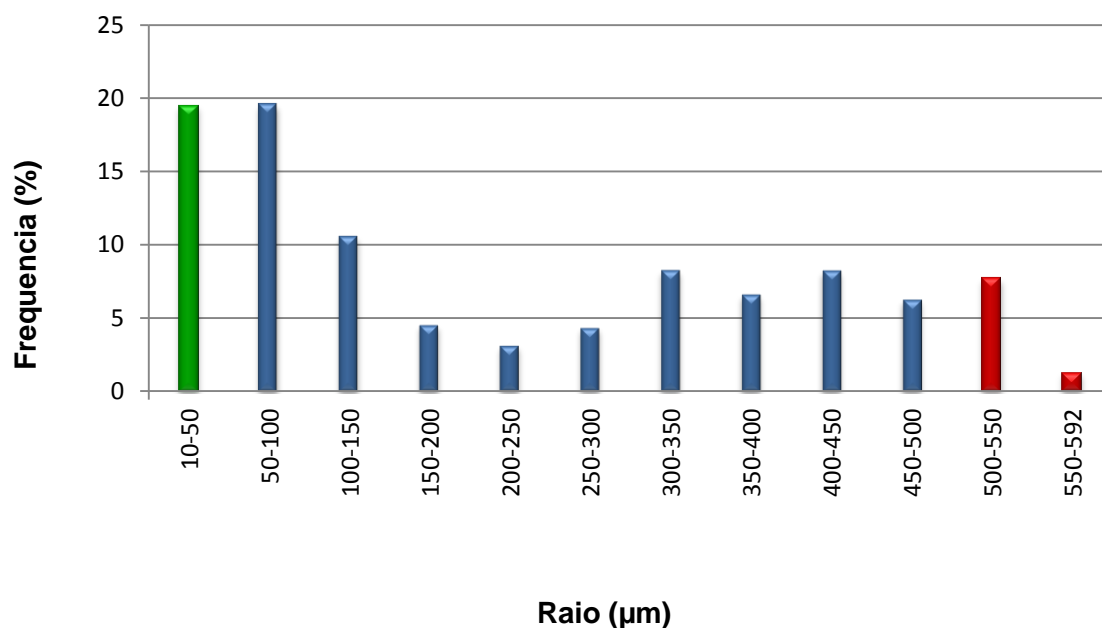


FIGURA 76 – Distribuição média de tamanho de poros bidimensional da amostra c1-3 (azul - abaixo que 500 μm ; vermelho – acima de 500 μm ; verde - maior frequência).

Para análise mineralógica foram coletas amostras em três pontos distintos conforme ilustrado na FIGURA 77.

Um difratograma (FIGURA 78) consiste de um registro da intensidade de raios difratados versus o dobro do ângulo de difração (2θ). Como o comprimento de onda da radiação X é conhecido, é possível, através da lei de Bragg, determinar os valores dos d's para cada pico ou banda de difração. A TABELA 7 apresenta os percentuais dos minerais encontrados na análise.

TABELA 7 - MINERAIS IDENTIFICADOS POR DRX DA C1

MINERIAS	C1-a1	C1-a2	C1-a3
Calcita Magnesiana	98%	97%	100%
Quartzo	2%	3%	-

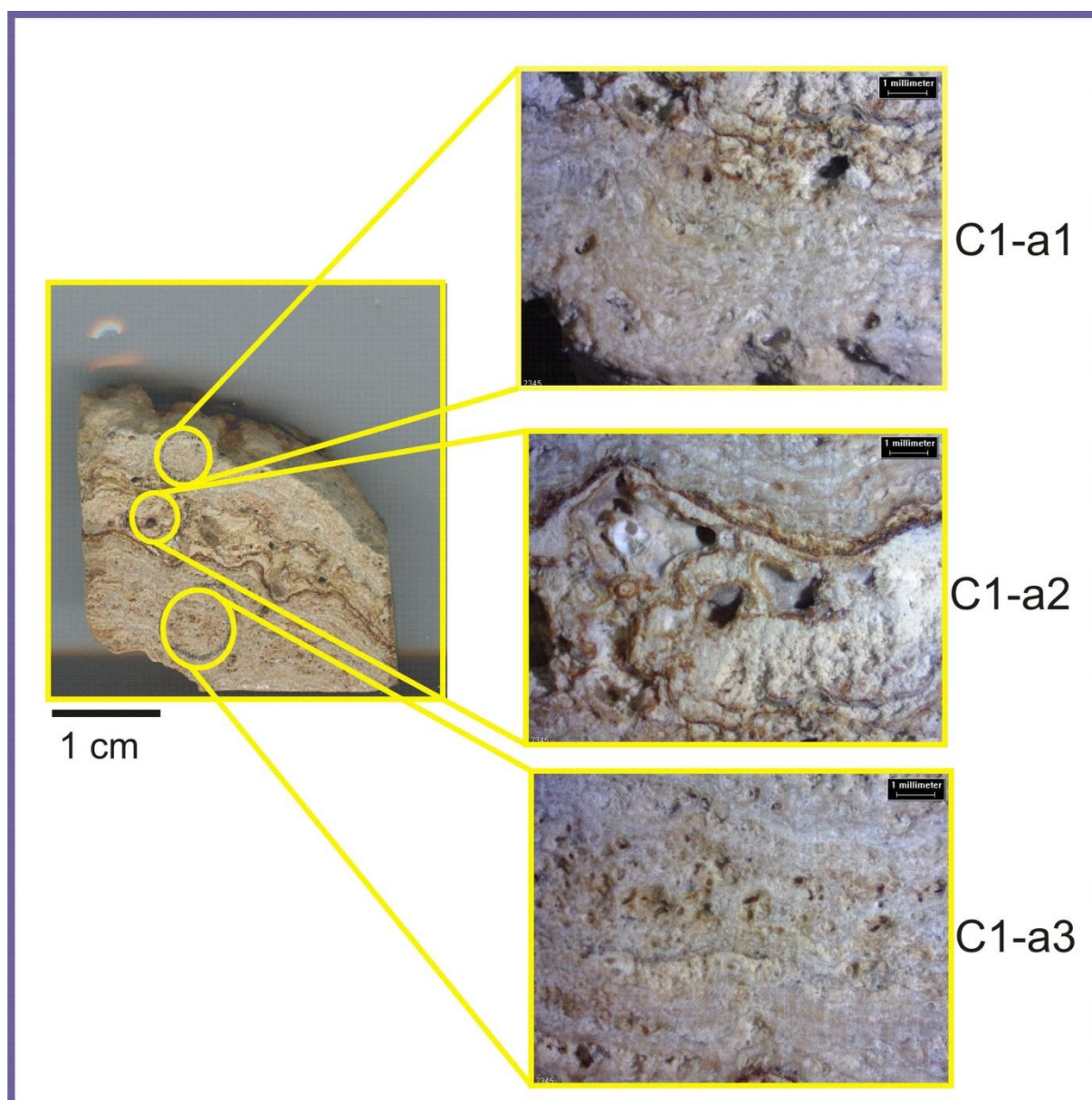


FIGURA 77 - Local onde foram coletadas amostras para análise mineralógica.

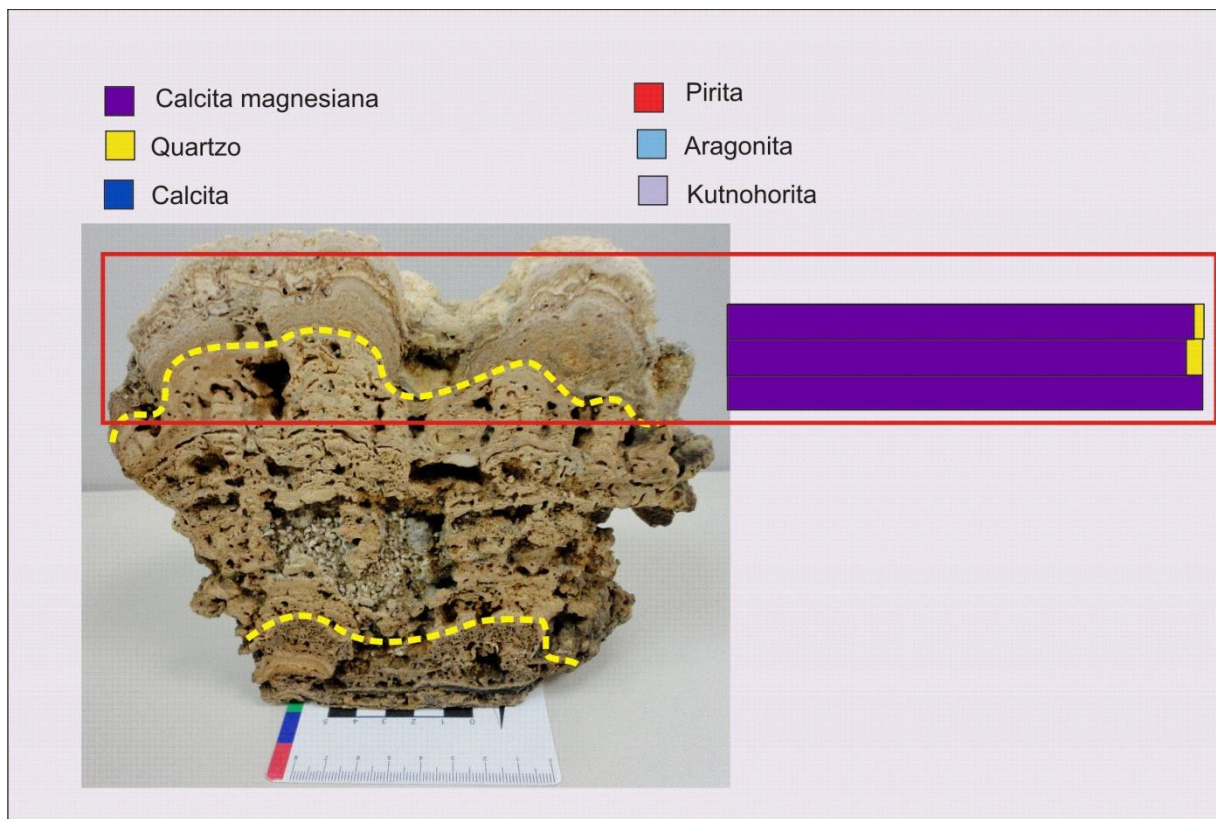


FIGURA 78 - Resultados da DRX de C1, ressaltando a composição com predominância de calcita magnesiana.

6 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

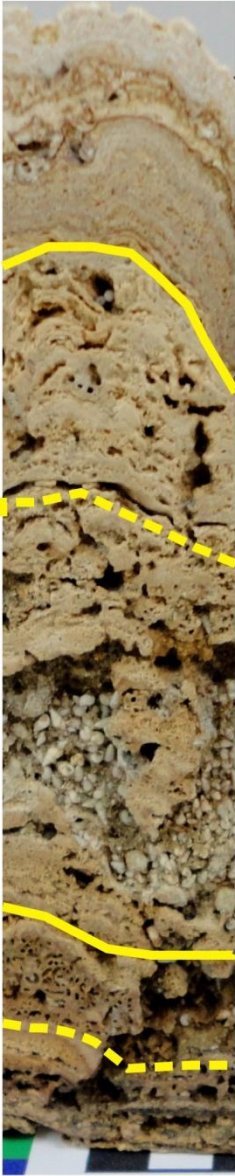
Nessa pesquisa procurou focar-se o desenvolvimento de técnicas para auxiliar na compreensão da tipologia, morfologia e da morfometria dos poros. Foi também estudado e caracterizado as propriedades físicas promotoras de porosidade e a quantificação da porosidade de rochas-reservatório.

Para uma melhor compreensão do arcabouço poroso, iniciou-se o trabalho fazendo uma tomografia, utilizando um tomógrafo médico, no estromatólito inteiro para se ter um panorama qualitativa e quantitativa do todo. Obteve-se resultado de porosidade total de 18,6%, porosidade efetiva de 17,4% e porosidade sem conectividade de 1,2%. Como a resolução do equipamento utilizado é de 500 μm , poros com tamanhos menores que essa resolução não puderam ser quantificados. Fez-se necessário a utilização de técnicas que pudessem analisar poros de menor tamanho.

A descrição mesoscópica detalhada integrada com a descrição petrográfica e auxiliada pelas análises microtomográficas foram extremamente importantes para classificar os tipos de porosidade e entender as diferentes características de cada camada e suas subcamadas que foram identificadas (FIGURA 79).

A pesquisa, quantificação e comparação de resultados obtidos por diferentes metodologias permitiram análises da tipologia, morfometria e morfologia da porosidade de estromatólitos recentes (FIGURA 79).

Constatou-se uma variação da estrutura interna entre a base e o topo do estromatólito. Assim como foi verificado pela pesquisa de Lemos (1996) ao analisar as estruturas internas dos estromatólitos fez-se uma divisão de três porções, porção inferior, porção intermediária e porção superior. Comparando os resultados encontrados nesse trabalho e os de Lemos (1996) é possível verificar certa semelhança nas estruturas internas dos estromatólitos encontrados na Lagoa Salgada.



	Características Descritivas	Tipos de Poros	Formas dos Poros	Mineralogia	Tamanho dos Poros	Porosidade Total Média	Porosidade Efetiva
C1	Laminada Esteira contínua Crenulada	Fenestral Moldica	Bem arredondados	Calcita Mg	9,4 μm a 50 μm	16%	15%
C2a	Esteira de estrutura alveolar e um pouco laminada	Vugular	Poros alongados na horizontal	Calcita Mg Quartzo	9,7 μm a 100 μm	32%	31%
C2b	Esteira de estrutura alveolar	Caverna Interpartícula Intrapartícula	Poros alongados e arredondados Presença de gastrópodes	Calcita Mg Kutnohorita	300 μm a 350 μm	35%	34%
C3a	Sem laminação	Vugular Interpartícula Intrapartícula	Poros bem arredondados causados por bioturbação	Kutnohorita Calcita Mg Aragonita	1200 μm a 1300 μm	24%	23%
C3b	Esteira continua	Vugular Interpartícula Intrapartícula	Poros arredondados seguindo a laminação	Calcita Mg Quartzo Aragonita	200 μm a 300 μm	25%	24%

FIGURA 79 - Quadro de integração dos resultados.

A camada C3 apresenta poros alveolares gerados por bioturbação (tubo de verme), na C3a não se tem laminação devido à presença de tubos vermitídeos que foi gerado pela intensa ação interna de microorganismos. Lemos (1996) constatou na Lagoa Salgada e Monty (1967) em Bahamas, que essa ausência de laminação nessa camada pode ser associada a uma diminuição da lamina d'água, aumentando a salinidade da lagoa e propiciando um ambiente estressante, causado a proliferação desses microorganismos. Porém em C3b verifica-se a presença de uma estrutura laminada e arenosa, que serve de base para o crescimento do estromatólito.

Os poros observados na amostra C3 apresentam uma morfometria na escala mesoscópica, poros que variam até aproximadamente um centímetro. Referente à distribuição média de tamanho de poros da camada C3a tem-se maior frequência de poros que estão no intervalo de 1200-1300 μm e da C3b 200-300 μm .

Na camada C3 observa-se presença de calcita magnesiana, quartzo, pirita e aragonita. Nota-se uma concentração elevada de kutnahorita (um mineral raro) em C3a (TABELA 8).

TABELA 8 - MINERAIS IDENTIFICADOS POR DRX NAS DIFERENTES CAMADAS

Minerais	C1-a1	C1-a2	C1-a3	C2a-1	C2a-2	C2b-1	C3a-1	C3a-2	C3b-1
Calcita Magnesiana	98%	97%	100%	83%	39%	20%	15%	28%	44%
Quartzo	2%	3%	-	17%	31%	27%	21%	-	36%
Pirita	-	-	-	-	6%	-	11%	-	6%
Aragonita	-	-	-	-	13%	12%	24%	-	14%
Calcita	-	-	-	-	11%	-	-	-	-
Kutnahorita	-	-	-	-	-	42%	30%	72%	-

A quantificação da porosidade na camada C3 é relativamente alta sendo que, porosidade total é de 25%, porosidade com conectividade 24% e porosidade sem conectividade de 1%. Sendo que C3a apresentou aproximadamente 24% de porosidade total e C3b 25%.

A camada C2 do estromatólito apresenta-se altamente porosa com poros variando em tamanho e forma. Sendo que em C2a apresenta partes laminadas, e

em C2b percebe-se que não se tem laminação. Possui porosidade intrapartículas, criada pelas carapaças dos gastrópodes, e porosidade tipo caverna e vugular. É a camada que tem maior concentração de gastrópode.

Referente à morfometria dos poros C2 observados em escala mesoscópica esta é a camada que contém maior quantidade de poros centimétricos, com tamanhos variando até aproximadamente três centímetros. Enquanto que na morfometria analisada pelas técnicas de determinação de distribuição média de tamanho de poro, na subcamada C2b tem-se maior frequência de poros num intervalo de 300-350 μm enquanto que em C2a está em 10-100 μm .

Constatou-se em C2 uma maior variação mineralógica (TABELA 8). Verificou um aumento do material detrítico, além da presença de outros minerais. Uma menor quantidade de calcita magnesiana e a uma elevada concentração de kutnahorita.

A camada C1 é a de menor porosidade, e possui menor concentração de gastrópode, quantidade baixa de grãos detríticos. Observa-se nessa camada uma pequena variação mineralógica, constatando apenas calcita magnesiana e uma pequena quantidade de quartzo (TABELA 8).

A camada C1 apresenta estrutura laminada, crenulada e ondulada e menos porosa. A ritmicidade das lamelas fica bem evidente nessa camada, as quais estão alternadas entre lamelas de matéria orgânica e as lamelas carbonática com fibras radiais.

A distribuição de tamanho de poro em C1 concentra-se no intervalo de 10-50 μm . Através da análise mesoscópica observou poros pequenos comparado com as outras camadas. Devido a diferentes análises feita concluiu-se que essa camada apresentou menor percentual de porosidade.

Como nenhuma técnica de determinação de porosidade é totalmente satisfatória, para que se tenha um melhor resultado se faz necessário à integração de resultados fornecidos por diferentes técnicas. Essa pesquisa demonstra que a tomografia médica a microtomografia integradas a petrografia, podem fornecer informações satisfatórias e contribuir de forma significativa para estudos de análises de rochas reservatório. Além de fornecer resultados mais detalhados sobre a morfologia, morfometria e tipologia dos poros e quantificação da porosidade.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÃO

Utilizando as técnicas da difração de raios X (DRX), tomografia médica e microtomografia computadorizada de raios X auxiliada com descrição petrográfica detalhada, foi analisada uma amostra de estromatólito de origem microbial do Recente coletado na Lagoa Salgada situado na região costeira do estado do Rio de Janeiro com a finalidade de caracterizar a tipologia, morfologia e morfometria dos poros, bem como realizar a quantificação dos poros conectados e isolados.

A análise indicou que o estromatólito possui uma variação na sua estrutura interna, apresentando uma tipologia heterogênea, tendo poros do tipo vugular, caverna, fenestral, intrapartícula, interpartícula e móldica. A morfologia da porosidade mostrou-se bem variada tendo poros arredondados, alongados e angulosos, tanto na vertical quanto na horizontal. Referente à morfometria tem-se poros desde a escala micrométrica a centimétrica e a porosidade efetiva no estromatólito é relativamente alta.

A camada mais basal (C3b) é formada por um substrato arenoso que serviu de base para o crescimento do estromatólito, enquanto a camada intermediária (C2) é a mais porosa e fossilífera e por fim a camada superior (C1) que é a mais laminada.

Das três camadas descritas, a basal denominada de C3b medindo aproximadamente dois centímetros, apresenta porosidade absoluta aproximada de 25% em esteira contínua com porosidade do tipo vugular, inter e intra-partícula e de poros arredondados, seguindo a laminação. A distribuição média de tamanho de poro nessa subcamada apresentou uma maior frequência de poros que estão no intervalo de 200-300 μm . As imagens em três dimensões mostram que a maioria dos poros estão conectados, e em sua maioria, os poros menores estão interconectados aos poros maiores. Calcita magnesiana, quartzo e aragonita são os minerais mais freqüentes.

A camada C3a sobrepõe a C3b, medindo aproximadamente dois centímetros, ausência de laminação, e com porosidade absoluta aproximada de 24%, sendo que os poros em sua maioria estão conectados. Uma das características que diferencia a camada C3 é a presença de bioturbação, que pode ser observada pelos poros arredondados, e a existência do mineral kuthonorita. Essa subcamada foi a que se apresentou mais distinta em relação à distribuição média de tamanho de poros, tendo uma maior frequência no intervalo de 1200-1300 μm .

A camada C2b, com aproximadamente seis centímetros, é bastante fossilífera com esteira de estrutura alveolar, com poros arredondados a alongados, tanto na vertical quanto na horizontal. A porosidade quantificada foi de aproximadamente 35%, os tipos de poros mais frequentes são cavernas, vugular, inter e intrapartículas. A camada C2b possui a maior variação na morfometria dos poros, desde a escala micrométrica a centimétrica, sendo que na descrição mesoscópica constatou-se que é a camada que apresentou poros com maior tamanhos até três centímetros. A maior frequência de poros está no intervalo de 10-100 μm .

Enquanto que em C2a, com uma medida de aproximadamente 3,5 cm, retorna a estrutura laminada com poros alongados, tanto na horizontal quanto na vertical, e porosidade de 32%. A tipologia predominante vugular, caverna, inter e intrapartícula, sendo que o tamanho dos poros é bem heterogêneo de até 2,0 cm observados nas descrições mesoscópicas e na distribuição média de tamanho de poros constatou maior frequência em poros de raios que estão localizados no intervalo de 300-350 μm .

A camada C1, medindo aproximadamente quatro centímetros, é a mais laminada com presença de esteiras contínuas e crenuladas e predominância de porosidade fenestral com poros arredondados. É a camada com menor porosidade apenas 16%, sendo 15% de poros com conectividade, sendo que o intervalo de maior frequência está de 10-50 μm , quantificados pela distribuição média de tamanhos de poros.

Dados de porosidade obtidos através de técnicas tradicionais (petrografia) integrado com uma técnica inovadora de alta tecnologia (micro-CT) possibilitou constatar que as técnicas devem ser complementares e não comparativos devidos às diferentes abordagens e as bases físicas. Porém, a combinação das diferentes

técnicas pode fornecer dados adicionais e valiosos para o estudo do arcabouço poroso de rochas carbonáticas, como possíveis rochas reservatório.

É de extrema importância a integração de diferentes técnicas para auxiliar a interpretação dos dados, pois nenhuma técnica é totalmente satisfatória, isoladamente. O desenvolvimento desse trabalho demonstra que os dados obtidos pela técnica de tomografia médica, microtomografia integrados com a petrografia, podem fornecer informações respeitáveis para contribuir no estudo e análise de uma rocha reservatório.

7.2 RECOMENDAÇÕES

Para uma maior compreensão da porosidade em estromatólito recente recomenda-se um estudo detalhado com as mesmas técnicas em estromatólitos recentes de outras regiões. Seria interessante também um estudo da variação na idade dos estromatólitos para verificar a porosidade nos mais antigos e compara-los com os recentes.

Recomenda-se, para resultados quantitativos mais precisos, uma análise de diversas técnicas em uma mesma amostra e integração de escalas. Análises em diferentes tamanhos e resoluções. Ou até integração de dados do tomógrafo médico com os obtidos no microtomógrafo e nanotomógrafo, e se possível acoplados a um acelerador de partículas (synchrotron).

REFERÊNCIAS

AIKTEN, J. D. **Classification and environmental significance of cryptalgal limestones and dolomites, with illustrations from the Cambrian and Ordovician of southwestern Alberta.** Journal of Sedimentary Petrology, 37(4): 1163-1178. 1967.

AIRD, E. G. A. **Basic physics for medical imaging.** Butterworth-Heinemann. 1988.

ARAÚJO, E. C. A. **Estudo e Aplicação do Algoritmo FDK para a Reconstrução de Imagens Tomográficas Multicortes.** Dissertação de Mestrado em Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BACOCOLI, G. **Os deltas marinhos holocênicos brasileiros. Uma tentativa de classificação.** Boletim Técnico da Petrobrás, 14:5-38, 1971.

BASTOS, A.C. & SILVA, C.G. **Evidências de períodos erosivos cíclicos na planície de cristas de praia do rio Paraíba do Sul, RJ.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Salvador, 1996. Anais, Salvador, SBG, 1: 379-383, 1996.

BONET, E.J. & GABRIELLI, M.L. **Propriedades das rochas – Notas de aula.** Petrobras, Salvador, 1991.

BURNE, R. V. & MOORE, L. S. **Microbialites: organosedimentary deposits of benthic Microbial communities.** Palaios, 2: 241-254. 1987.

CHOQUETTE, P. W.; PRAY, L. C. **Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates.** American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 54, p. 207 – 250, 1970.

CPRM. **Geologia do Estado do Rio de Janeiro.** Brasília. 85 pp, 2001.

CNUdde, V.; JACOBS, P.J.S. **Monitoring of weathering and conservation of building materials through non-destructive X-ray computed microtomography.** Environmental Geology. Belgium. 46:477-485. 2004.

DEAN, W. E.; FOUCH, T. D. **Carbonate Depositional Environments. American Association of Petroleum Geologists.** Lacustrine Environment. In Scholle, P. A.; Bebout, D. G. & Moore, C. H. (eds.), *Memoir*, 33: 98-130, 1983.

DIAS, G.T.M.; SILVA C.G.; MALSCHITZKY, I.H.; PIRMEZ, C. **A planície deltaica do Rio Paraíba do Sul; seqüências sedimentares subsuperficiais.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33. Rio de Janeiro, 1984. Resumos expandidos, Rio de Janeiro, SBG, 4: 1565–1576, 1984a.

DIAS, G.T.M.; SILVA, C.G.; MALSCHITZKY, I.H.; PIRMEZ, C. **A frente deltaica do Rio Paraíba do Sul; fisiografia submarina e distribuição sedimentar.** 1984a. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33. Rio de Janeiro, 1984. Resumos expandidos, Rio de Janeiro, SBG, v1, p.83-84, 1984b.

DNPM /CPRM. **Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleontológicos (SIGEP)** – Brasília, p. 87-93.

DOMINGUEZ, J.M.L. **Delta dominados por ondas: críticas às idéias atuais com referência particular ao modelo de Coleman & Wright.** Revista Brasileira de Geociências, 20: 352-36, 1990.

DOMINGUEZ, J.M.L.; BITTENCOURT, A.C.S.P.; MARTIN, L. **Sea-level history and evolution of river mouth-associated beach-ridge palins along the east-southeast Brazilian coast: a summary.** Sea level fluctuation and coastal evolution. p.115–11, 1987.

EISBERG, R., RESNICK, R. **Física Quântica.** New York, John Wiley & Sons Inc. 1994.

FRANÇA, A.B., QUINTAES, C.M.S.P., CARVALHO, M.D., MUNIZ, M.C., COLLINS, L. **Relatório de Viagem à Shark Bay, Western Austrália.** Relatório interno PETROBRAS. 2006.

FERNADES, J. S. **Caracterização microestrutural do espaço poroso de rochas reservatório da Bacia do Rio Tibagi por microtomografia de raios X.** Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Estadual do Paraná, tese de doutorado. 2009.

FLUGEL, E. **Microfacies of Carbonate Rocks. Second Edition, Spring-Verlag Heidelberg,** p. 984, 2010.

FRONDEL, C. & BAUER, L. H. **Kutnahorite: A Manganese Dolomite $\text{CaMn}(\text{CO}_3)_2$** . Department of Mineralogy, Harvard University, Mass., and New Jersey Zinc Company Franklin, N.J. Manuscript received July 20, 1954.

GASPARI H.C., FERNANDES C.P., RODRIGUES C.R. **Determinação Computacional da Permeabilidade de Rochas Reservatório**. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 3, Anais, p.1-6. 2004.

GONÇALVES, C.Z. **Proveniência e distribuição dos minerais pesados no complexo deltaico do rio Paraíba do Sul**. Programa de Pós - graduação em Geologia e Geofísica Marinha, Universidade Federal Fluminense, Dissertação de Mestrado, 113pp, 2005.

GONÇALVES, C.Z. & SILVA, C.G. **Proveniência e distribuição dos minerais pesados no complexo deltaico do rio Paraíba do Sul**. In: Simpósio de Geologia do Sudeste 7, Niterói, 2005. Resumos expandidos, Niterói, SBG-RJ/ES. CD-ROM, 6 pp, 2005.

GOOGLE EARTH. Imagem de satélite retirada do Google Earth. Acessada: 22/03/2012.

GUERRERO, R. **Crucial crises in biology: life in the deep biosphere**. International Microbiology, v.1, pp. 285-294. 1998.

GROTZINGER, J.P. **Facies and evolution of Precambrian carbonate depositional systems: Emergence of the modern platform archetype**. In: Crevelo, P.D.; Wilson, J.L.; Sarg, J.F.; Read, J.F., eds., *Controls on carbonate platforms and basin development*, Special Publication of Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, 44, p. 79-106. 1989.

JAMES, N. P. **Carbonate Depositional Environments**. American Association of Petroleum Geologists. Memoir ,Reef Environment. In Scholle, P. A.; Bebout, D. G. & Moore, C. H. (eds.), 33: 346-462, 1983.

KALKOWSKY, E. **Oolith and stromatolith in norddeutschen Buntsandstein**. Deutsche Geologisches Gessellschaft Zeitschrift, 60, 112 pp. 1908.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. 3° ed., New York, John Wiley & Sons Inc. 2000.

LAMEGO, A.R. **Geologia das quadriculas de Campos, São Tomé, Lagoa Feia e Xexéu.** Div. Geol. Min. DNPM. Bol. 154. Rio de Janeiro, 1955.

LEMOS, R.M.T. **Estudo das fácies deposicionais e das estruturas estromatolíticas da Lagoa Salgada - Rio de Janeiro.** Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica Marinha, Universidade Federal Fluminense, Dissertação de Mestrado, 1996.

LOPES, R.T., RODRIGUES, J.L, ASSIS, J.T., DE JESUS, E.F.O., OLIVEIRA, L.F. **Evaluation of Microtomography System with and X – ray Microfocus Tube Applical Radiation and Isotopes**, 48(10):1437-1442, 1997.

LÚCIA, F.J., **Carbonate Reservoir Characterization**, Springer Verlag, Berlin, 1999.

MARTIN, L.; SUGUIO, K; DOMINGUEZ, J.M.L.; FLEXOR, J.M. **Geologia do Quaternário costeiro do litoral norte do Rio de Janeiro e do Espírito Santo.** Belo Horizonte, CPRM, 112pp, 1997.

MARTIN, L.; FLEXOR, J.M. **Porque a planície costeira do rio Paraíba do Sul não pode ser denominada de “clássico delta dominado por ondas”.** In: Simpósio de Geologia Regional RJ-ES, 1, Rio de Janeiro, 1987. Anais, Rio de Janeiro, SBG, p.70- 84, 1984.

MARTIN, L.; SUGUIO, K. **Excursion route along the coastline bef ween the town of Cananea (State of São Paulo) and Guaratiba out-let (State of Rio de Janeiro).** Internacional Symposium on Coastal Evolution in the Quartenary Spec. São Paulo, p. 2-97, 1978.

MARTIN, L., SUGUIO, K., FLEXOR, J.M., TESSLER, M.G., ELCHLER, B.B. **Significado geológico das variações dos graus de arredondamento das areias holocênicas da planície costeira do rio Paraíba do Sul.** XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, 1984.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J. M.; DOMINGUEZ, 1. M. L. & AZEVEDO, A. E. G. **Evolução da planície costeira do rio Paraíba do Sul (RJ) durante o Quaternário: influência das flutuações do nível do mar.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33. Rio de Janeiro, 1984. Anais. Rio de Janeiro, SBG, 1:84-97, 1984a.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, 1. M.; TESSLER, M. G. & EICHLER, B. B. **Significado geológico das variações dos graus de arredondamento das areias**

holocênicas da planície costeira do rio Paraíba do Sul (RJ). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33. Rio de Janeiro, 1984. Anais. Rio de Janeiro, SBG, 1:119-132, 1984b.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J.M. **As flutuações de nível do mar durante o quaternário superior e a evolução geológica de “Deltas” brasileiros.** São Paulo, Universidade de São Paulo, 186p. (Boletim IG-USP, Publicação Especial, n.15), 1986.

MARTIN, L.; SUGUIO, K. E & FLEXOR, J. M. **As flutuações de nível do mar durante o quaternário Superior e a evolução geológica de deltas brasileiros.** São Paulo, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, p.1-186, 1993.

MCNAMARA, K. ***Stromatolites*.** Western Australian Museum, 28 pg. Primeira edição: 1993, 2005.

MELIM, L.A., ANSELMETTI, F.S., EBERLI, G.P., **The Importance of Pore Type on Permeability of Neogene Carbonates, Great Bahama Bank. In Subsurface Geology of a Prograding Carbonate Margin, Great Bahama Bank: Results of the Bahamas Drilling Project.** Ed. Ginsburg, R.N., SEPM Special Publication 70, 217–240, 2001.

MONTY, C.L. Distribution and structure of recent stromatolitic algal mats, eastern Andros Island, Bahamas. Ann. Soc. Bel. V.90, p.55-102. 1967.

MOREIRA, J.L.P., MADEIRA, C.V., GIL, J.A., MACHADO, M.A.P. **Bacia de Santos.** In: Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2)531-549, 2007.

NAGATANI, T.; SAITO S.; SATO, M.; YAMADA, M. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system. **Scanning Microscopy.** v.11, 901-909, 1987.

PATCHINEELAM, S.R. E REBELO, A.R. **Ocorrência de dolomita diagenética numa lagoa hipersalina.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33, Rio de Janeiro, Anais, SBG, p. 245- 253, 1984.

RAJA, G.P., MILANI, E.J. **Origem e evolução de Bacias sedimentares.** Petrobrás, Rio de Janeiro, 415pp, 1990.

REMEYSEN, K., SWENNEN, R. **Application of microfocus computed tomography in carbonate reservoir characterization: Possibilities and limitations.** Geology Section, Katholieke Universiteit Leuven, Celestijnenlaan 200E-Box 02408, B-3001 Heverlee, Belgium Received 14 November 2006; received in revised form 2 July 2007.

RODRIGUES, M.A., CARVALHO, M.G.P. & DIAS, G.T.M. **Interpretação paleoambiental das lagoas Salgadas e das Ostras (RJ) Brasil, com base em foraminíferos.** In: II Congresso Latino-Americano de Paleontologia, p.893-906. 1981.

SABATER, S.; GUARCH, H.; ROMANI, A. & MUÑOZ, I. **Stromatolitic communities in Mediterranean streams: adaptations to a changing environment.** In: SABATER, S.; GUARCH, H.; ROMANI, A. & MUÑOZ, I. (eds.) Netherlands. Biodiversity and Conservation. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, p.379-39. 2000.

SANTELLI, R.C.L. **Estudos de isótopos estáveis em sedimentos carbonáticos da lagoa Vermelha, Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro, PUC-Rio, Tese de Doutorado, 85pp, 1988.

SCHMIDT, V.; MCDONALD, D.A. **The role in secondary porosity in the course of sandstone diagenesis.** Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 26, p. 175–207, 1979.

SEERAM, E. **Computed Tomography – Physical Principles, Clinical Applications, and Quality Control.** 2nd Ed., W. B. Saunders Company, London, UK (Cap. 4, 5, 6 e 11), 2001.

SILVA, C.G. **Estudo da evolução geológica e geomorfologia da região da Lagoa Feia, RJ.** Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, 160pp, 1987.

SILVA E SILVA, L.H. **Contribuição ao conhecimento da composição microbiana e química das estruturas estromatolíticas da lagoa Salgada, Quaternário do Rio de Janeiro, Brasil.** Programa de Pós Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 176 pp, 2002.

SOARES, F. A., LOPES, H. B. **Tomografia Computadorizada**. Núcleo de Tecnologia Clínica, Santa Catarina, 2001.

SPADINI, A. R., MARÇAL, R. A. **Porosidade em reservatórios carbonáticos: Algumas considerações**. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, 13(1): 129-138, 2005.

SRIVASTAVA, N. K., ROCHA, A. J. D. **Fazenda Cristal, BA Estromatólitos mesoproterozóicos**. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D. A.; Queiroz, E. T.; Winge, M. & BERBERTBORN, M. L. C. (eds.). 01:63-71. 2002.

STEARN C.W. & CARROLL R.L. **Paleontology: the Record of Life**. John Wiley & Sons, Inc., 463 p, 1989.

SUGUIO, K. **Introdução à sedimentologia**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher - EDUSP, (317p), 1973.

SUGUIO K. **Rochas Sedimentares**. 1 ed. São Paulo, Edgard Blucher Ltda. 1982.

TAUHATA, L., SALATI, I. P. A., DI PRINZIO, R., DI PRINZIO, A. R. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. CNEN, 2003.

TETZNER, G. C. **Aplicação da Tomografia Computadorizada Industrial na Análise de Rochas**. Programa de Pós Graduação em Ciências na Área de Tecnologia- Aplicações, Universidade de São Paulo, Tese de Mestrado, 2008.

TOMAZ, E.A. **Mapeamento de paleocanais ao longo da planície costeira do rio Paraíba do Sul e plataforma continental da bacia de Campos e sua possível relação com a evolução do canyon Almirante Câmara**. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, 2005.

WALTER, M. R. **Stromatolites. Developments in Sedimentology**. Glossary of selected terms. In Walter, M. R. (ed.), 20: 687-692, 1976.

WINTER, W.R., JAHNERT, R.J., FRANÇA, A.B. **Bacia de Campos**. In: Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2)511-529, 2007.